

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



Буляккулов Марсель Маратович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО
ПОТОКА С ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ ЛА**

Специальность

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор

Никитин Петр Васильевич

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Методы и средства моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой	15
1.1. Применение высокоскоростных гетерогенных потоков в различных отраслях техники.....	15
1.2. Моделирование гетерогенных потоков и их взаимодействие с элементами конструкций.....	24
1.3. Газодинамика гетерогенных потоков.....	37
1.4. Силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу.....	46
Выводы по главе 1.....	47
Глава 2. Методы и средства диагностики параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой	48
2.1. Лазерная доплеровская анемометрия.....	48
2.2. Определение плотности конвективного теплового потока.....	52
2.3. Определение температуры поверхности исследуемого объекта.....	58
Выводы по главе 2.....	62
Глава 3. Обтекание летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком	63
3.1. Математическая модель обтекания летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком.....	63
3.2. Особенности численного решения математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.....	72
3.3. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.....	78
Выводы по главе 3.....	95
Глава 4. Механизм взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов	96
4.1. Физическая модель процессов взаимодействия твёрдых частиц с поверхностью.....	97

4.2. Динамика удара частицы о поверхность.....	104
4.3. Анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком.....	105
4.4. Некоторые режимы эрозионного разрушения конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком.....	109
Выводы по главе 4.....	119
5. Некоторые особенности взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата.....	120
5.1. Анализ особенностей термохимического и эрозионного разрушения конструкционных материалов при взаимодействии с высокоскоростным и высокотемпературным гетерогенным потоком.....	121
5.2. Влияние концентрации частиц в гетерогенном потоке на эрозионную составляющую термоэрозионного разрушения конструкционных материалов.....	131
Выводы по главе 4.....	147
Заключение.....	148
Список литературы.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации.

В связи с не прекращаемым развитием и совершенствованием техники постоянно повышаются и требования к самим изделиям, их функциональным возможностям и условиям, в которых они эксплуатируются. Данный факт проявляется в непрерывном увеличении скорости, температуры, агрессивности рабочих сред, чрезмерных механических нагрузок.

Одним из основных факторов, сдерживающих развитие таких отраслей, как энергетическое и транспортное машиностроение, зачастую являются применяемые материалы, а точнее ограничения, связанные с их свойствами. Примером подобных ограничений параметров является эрозионная стойкость конструкционных и теплозащитных материалов при взаимодействии с высокоскоростными гетерогенными потоками [1, 2].

В настоящее время, задачи взаимодействие высокоскоростных гетерогенных потоков с различными конструкциями вошли в разряд проблемных задач машиностроения. К таким задачам относятся:

- борьба с механической эрозией поверхности элементов конструкции высокоскоростных летательных аппаратов при обтекании гетерогенными потоками большой скорости;

- совершенствование технологии механической обработки поверхностей конструкции с использованием высокоскоростных гетерогенных потоков в качестве технологического инструмента;

- дальнейшее развитие технологий формирования разнофункциональных покрытий на поверхностях конструкций с использованием газодинамических методов (высокоскоростных гетерогенных потоков) [1].

Исследование проблемы эрозионного разрушения материалов начались учеными примерно 150 лет тому назад. В тот момент причиной являлось активное развитие горнодобывающей промышленности, Следует обратить внимание, что

результаты исследований в данном направлении привели к увеличению скорости соударения частиц о поверхность элементов конструкции почти до 500 м/с [3].

В газовой поток частицы могут попадать как естественным, так и искусственным путем. Примерами технологий, где используются гетерогенные потоки (поток газа с твердыми или жидкими частицами), являются ракетные двигатели с твердым топливом на металлизированной основе, струйно-абразивная обработка деталей машин, пневмотранспорт сыпучих веществ и т.д. Несмотря на использование современных фильтрационных систем, зачастую не получаются полностью избавиться от присутствия частиц в потоке рабочего тела: конденсированный пар на лопатках в паротурбинных агрегатах электростанций; пыль на лопатках газотурбинных двигателей танков, которая приводит к появлению усталостных напряжений, а со временем и к разрушению поверхностного слоя лопаток.

При высокоскоростном полете в нижних слоях атмосферы приходится преодолевать различные участки с естественными (дождь, снег, град) и искусственными (пыль) образованиями. Данные образования присутствуют как в атмосфере Земли, так и других планет. Даже в чистой атмосфере поверхность спускаемых аппаратов сильно нагревается, в следствии чего происходит термохимическое разрушение внешней тепловой защиты (абляция). При попадании спускаемого аппарата в пылевое (дождевое) облако теплообмен на его поверхности может увеличиваться более, чем на порядок величины, а эрозионное разрушение от высокоскоростных ударов частиц может возрастать на два порядка по сравнению с абляцией. [2, 4, 5 ,6]

Решение указанных задач, как правило, осуществляется экспериментально-теоретическими методами.

Задача обтекания тел разных форм высокоскоростными гетерогенными потоками все ещё остается актуальной при эксплуатации в экстремальных условиях изделий авиационной, ракетной и космической техники. Сложность решения такой задачи заключается в том, что она относится к разряду комплексных, многопараметрических задач. В ней тесно сопряжены задачи

термо-газодинамики и тепло-массообмена гетерогенной неизотермической среды, а также механического взаимодействия с обменом импульса дискретной фазы, сопровождающегося процессом эрозии поверхности обтекаемого тела [1].

Обтекание тел гетерогенным потоком осуществляется двумя фазами, газообразной (газ-носитель) и твёрдой (частицы разной дисперсности, «К-фаза»). При высоких скоростях набегающего газового потока содержание в нём даже малой концентрации частиц резко изменяет картину обтекания и вызывает существенное дополнительное разрушение элементов конструкции летательного аппарата. При этом к термохимическому и силовому воздействию на обтекаемое тело газовой составляющей набегающего потока, добавляется термоэрозионное, механическое воздействие дискретной фазы. Все эти газодинамические, тепловые, термохимические и термоэрозионные процессы тесно взаимосвязаны и вблизи поверхности (пограничный слой) обтекаемого тела [2]. Они видоизменяют механизмы термо-газодинамики и энерго-массообмена, а также оказывают влияние непосредственно на ресурс работы конструкции. Например, даже незначительное содержание «К-фазы» в высокоскоростном газовом потоке существенно изменяют режим течения, интенсифицируют теплоотдачу, увеличивают термохимическое разрушение и механическую эрозию поверхности конструкции за счет выброса массы осколков из образовавшихся при ударе кратеров. Последние, обладая значительной скоростью, достигают головной ударной волны, искажая её профиль и перестраивая все поле скоростей газового потока в сжатом и пограничном слое. Прогрев подповерхностных слоев обтекаемого тела влияет на его эрозионную стойкость, прежде всего, на массу выброшенных из кратера осколков и на конвективный теплообмен.

Кроме того, в процессе совместного движения газ-носитель и «К-фаза» обмениваются энергией и импульсом, что может явиться причиной плавления, горения или испарения частиц, то есть различных физико-химических превращений, в результате которых размеры и форма частиц могут измениться [2]. Это также оказывает влияние на режимы течения и обтекания.

Интенсивность механизма взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью конструкции определяется их кинетической энергией. Например, уровень кинетической энергии частиц в момент удара о поверхность обтекаемого тела может привести или к их внедрению в тело конструкции или к эрозии поверхности и выбросу в поток новых встречных частиц. Это усугубляет математическое описание процесса обтекания высокоскоростным гетерогенным потоком конструкции летательного аппарата. Задача описания становится ещё более сложной, поскольку в условиях реального полёта летательного аппарата гетерогенные потоки являются полидисперсными. В таком случае, частицам в потоке свойственно распределение по размерам и массе, что необходимо учитывать при разработке математической модели. Необходимо отметить, что отличительной особенностью эрозионного разрушения в гетерогенных потоках наряду со скоростью соударения является также и многократность соударения. Предполагается, что из-за данных фактов на данный момент не получается связать скорость эрозионного разрушения с каким-либо параметром теории пластичности и упругости [2].

Важным фактом является то, что скорость теплового разрушения поверхности преграды при взаимодействии с гетерогенным потоком, содержание «К-фазы» в котором составит даже 1%, может увеличиться в несколько раз. Необходимо отметить также, что эрозионное разрушение начинается при скорости соударения частиц «К-фазы» о поверхность преграды 100 – 200 м/с. Данная величина значительно ниже порогового значения теплового разрушения для неохлаждаемых металлических конструкций.

Количество исследований эрозионного разрушения резко увеличилось за последние три десятилетия [7, 8, 9, 10]. Интерес к исследованиям эрозионной стойкости материалов как в нашей стране, так и за рубежом особенно повысился за последние 15-20 лет. Такие понятия как «эрозионное разрушение» и «теплообмен в гетерогенных потоках» стали широко использоваться. Под эрозионным разрушением подразумевают процесс уноса массы какого-либо материала (преграды) под воздействием потока бомбардирующих его частиц.

Основные физические процессы, имеющие место при эрозии, такие как: преобразование относительной кинетической энергии удара в тепловую и кинетическую энергию осколков соударяющихся тел, образование и направление эжекции из кратера, размер и форма кратера и т.д. – наилучшим образом могут быть исследованы на основе единичного удара на баллистических стендах. На данных стендах могут быть точно определены скорость удара, а также масса и форма соударяющихся тел. Поэтому для определения основных закономерностей процесса эрозионного разрушения материалов в гетерогенных потоках, исследователями было предложено разделение гетерогенного потока на поток газа-носителя и поток «К-фазы». Соответственно, для этого необходимо было совершенствовать экспериментальные и расчетные методы для изучения соударения одиночных частиц с поверхностью преграды. Все известные экспериментальные и теоретические исследования единичного удара проведены, в основном, применительно к метеоритному повреждению авиационных и космических летательных аппаратов, конструкций солнечных батарей и теплообменников космического назначения и т.п. [2]

При исследовании одиночного удара были получены результаты, которые позволили изучить кинетику установления процесса разрушения, а также определить степень влияние на нее таких параметров как скорость и угол соударения и размер частиц. Естественно, что во все выявленные закономерности входит много эмпирических констант.

Подход разделения гетерогенного потока на поток газа-носителя и поток «К-фазы» не позволил получить ответ на все поставленные исследователями вопросы. Так нет единого мнения по конвективному теплообмену в гетерогенных потоках. Одна группа исследователей утверждает, что присутствие частиц в потоке увеличивает коэффициент теплообмена. Другая группа считает, что присутствие частиц в турбулентном пограничном слое должно приводить к снижению скорости и температуры газа-носителя. Также не удалось привести обоснование разработанных критериев подобия и установлению диапазонов влияния тепловых, силовых и ударно-волновых процессов [2]. Данные факты не

позволяют сравнивать результаты экспериментальных исследований, проведенных на различных установках.

В настоящее время, несмотря на то, что приоритет в изучении данной проблемы принадлежит эксперименту, роль математического моделирования непрерывно растет. Данный фактор проявляется в развитии методов вычислительной техники, в разработке математических моделей и в разработке программных комплексов для решения поставленных задач.

Целью настоящей работы является исследование процесса взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с элементами конструкции летательного аппарата.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Критический анализ существующих способов моделирования процессов взаимодействия гетерогенного потока с преградой.
2. Критический анализ методов и средств диагностики параметров высокоскоростных гетерогенных потоков.
3. Разработка математической модели и численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата.
4. Исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов.
5. По результатам исследования получение соотношений для расчёта параметров эрозионного разрушения конструкционных материалов.

Положения, выносимые на защиту

Математическая модель газовой фазы и «К-фазы» процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

Зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов.

Соотношения для расчёта процесса разрушения высокоскоростным гетерогенным потоком.

Методы исследования, используемые в работе, направлены на решение поставленных задач и достижения указанной цели.

На основе имеющегося опыта исследований взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с преградами, проведенного различными авторами, и с помощью существующих средств численного моделирования была предложена математическая модель газовой фазы и «К-фазы» процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, и расчетная схема для ее решения с использованием CFD комплекса ANSYS CFX.

С использованием предложенного метода разделения тепловой и эрозионной составляющих термоэрозионного уноса конструкционных материалов и принципа сопоставления эрозионной стойкости и температуропроводности было выявлено два класса конструкционных материалов (металлические и композиционные ТЗМ) с принципиально разными механизмами их разрушения при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками.

В последующих разделах работы приведено решение всех вышеперечисленных задач.

Научная новизна работы выражается в том, что:

- предложена математическая модель процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции ЛА конической формы, притупленного сферой. С использованием предложенной модели проведено численное моделирование процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного ЛА;

- рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов;

- проведена оценка интенсивности эрозионного разрушения материалов;

– получены соотношения для расчёта процесса разрушения высокоскоростным гетерогенным потоком.

Теоретическая ценность работы заключается в том, что составлена математическая модель взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью конструкционных материалов. Предложен метод её численного решения при заданных граничных условиях.

Практическая значимость работы состоит в том, что получены соотношения для расчёта параметров эрозионного разрушения ряда конструкционных материалов, которые могут быть использованы при проектировании высокоскоростных ЛА. Получены характеристики эрозионного разрушения некоторых конструкционных материалов.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются удовлетворительным совпадением результатов численного решения с использованием предложенной математической модели, с данными стендовых экспериментов, и с тестовыми расчётными данными других авторов, полученными при прочих равных начальных условиях.

Личный вклад соискателя:

– исследование механизма взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью ряда конструкционных материалов;

– разработка математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком элементов конструкции летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;

– с использованием предложенной математической модели проведение численного моделирования процесса обтекания гетерогенным потоком поверхности конструкции высокоскоростного летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;

– получены зависимости для оценки эрозионного разрушения конструкционных и теплозащитных материалов при воздействии высокоскоростных высокотемпературных потоков.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной доложены на научно-технических конференциях:

- а) II Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем» (Москва, Россия, 21-22 ноября 2013г.);
- б) «16-я Научно-техническая конференция по аэродинамике» (п. Володарского, Россия, 26-27 февраля 2015г.)
- в) 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2015» (Москва, Россия, 16-20 ноября 2015г.);
- г) Всероссийская научно-техническая конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, Россия, 24-27 ноября 2015г.);
- д) «Одиннадцатая Международная конференция по Неравновесным процессам в соплах и струях» (Оздоровительно-учебный центр МАИ «Алушта», Россия, 25 - 31 мая 2016г.).

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Математическая модель обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 5, № 11. – С. 490-497.[11]
2. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 7, № 12. – С.558-565.[12]

Публикации в других изданиях:

3. Буляккулов М.М., Головнев И.Г., Лапшин К.В., Платов С.А., Семенов А.С. Численное моделирование процесса выхода АСП из отсека самолета-носителя с оценкой совместимости и безопасности применения. // Сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». Москва. ГосНИИАС. 21-22 ноября 2013. С. 184.
4. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком

летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2015». Москва. МАИ. 16-20 ноября 2015. С.388-389.

5. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком космического летательного аппарата. // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». Москва. ЦИАМ имени П.И. Баранова. 24-27 ноября 2015. С.330-331.

6. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Решение задачи взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата. // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта. 25-31 мая 2016. С.65-67.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по работе и списка литературы; содержит 155 страниц, 70 рисунков, 4 таблицы, список литературы из 76 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи работы. Изложены новизна работы, предмет исследования, степень разработанности проблемы. Кратко охарактеризованы методы исследования. Показана теоретическая и практическая значимость работы. Описана структура и объем работы, указаны публикации по теме исследования.

В первой главе диссертационной работы представлены примеры применения высокоскоростных гетерогенных потоков в различных отраслях техники, способы моделирования гетерогенных потоков и их взаимодействия с элементами конструкций, описаны силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу.

Во второй главе описаны методы и средства диагностики параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой.

В третьей главе представлена математическая модель процессов термогазодинамики и тепло-массообмена на поверхности ЛА, основанная на решении дискретных аналогов системы уравнений Навье–Стокса и уравнений

дополнительных моделей. Данная математическая модель позволяет определять значения параметров гетерогенного потока только на основании известных геометрических характеристик ЛА и параметрах набегающего гетерогенного потока. Также продемонстрировано численное моделирование процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

В четвертой главе проведен анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды, получены соотношения для расчёта ряда параметров, реализуемых в процессе взаимодействия. Также проведен критический анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком, в результате установлено наличие для каждого рода конструкционных материалов некоего порогового значения скорости частиц и температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности их эрозионного разрушения. По результатам экспериментальных исследований с использованием полученного соотношения (4.23) рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов.

В пятой главе с помощью предложенного метода разделения тепловой и эрозионной составляющих термоэрозионного уноса конструкционных материалов и принципа сопоставления эрозионной стойкости и температуропроводности было выявлено два класса конструкционных материалов (металлические и композиционные ТЗМ) с принципиально разными механизмами их разрушения при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками. Также проведен анализ влияния массовой концентрации частиц в гетерогенном потоке на механизм термоэрозионного разрушения стеклопластика и на процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы и выводы, следующие из представленных результатов.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ТВЕРДОЙ СТЕНКОЙ

Гетерогенные потоки широко используются в различных отраслях промышленности для решения конкретных проблемных задач. Особенно остро стоит задача механической эрозии конструкций высокоскоростных ЛА при взаимодействии с гетерогенными средами (дождевая, пылевая облачность, натекание высокоскоростных струй на конструкцию ЛА при истечении струи из РДТТ).

В данной главе проводится анализ применения высокоскоростных гетерогенных газовых потоков и методов их математического моделирования при решении задач взаимодействия с твердой поверхностью.

1.1. Применение высокоскоростных гетерогенных потоков в различных технологиях промышленного машиностроения

Проведем оценку режимов работы известных установок транспортного и энергетического машиностроения. Для этого сравним их основные тепловые и эрозионные параметры. В качестве тепловых параметров можно использовать такие характеристики как: плотность конвективного теплового потока, обусловленная обтеканием стенки газовой фазой, или температуру торможения (восстановления) набегающего газового потока. В качестве эрозионных параметров - кинетическую энергию частиц набегающего на стенку гетерогенного потока или скорость взаимодействия частиц со стенкой.

На рисунках 1.1 ÷ 1.6 представлены схемы, а на рисунке 1.7 основные режимные параметры взаимодействия гетерогенных потоков со стенками или другими элементами конструкций в транспортных системах и энергетическом оборудовании [11].

В этой связи на рисунках из опубликованных данных представлены, с одной стороны, типичные, используемые в технологиях параметры гетерогенных потоков, а с другой, предельные по параметрам варианты естественных природных двухфазных сред в виде дождевых или пылевых образований. Например, в качестве таких вариантов представлены технологии производства, в которых скорости взаимодействия частиц с поверхностью тела составляют несколько метров в секунду (пневмотранспорт, рисунок 1.1). Представлены также и экстремальные значения скоростей – от нескольких километров в секунду при полёте гиперзвуковых ЛА в запыленной атмосфере до десятков километров в секунду при взаимодействии микрометеоритов с поверхностями защитных экранов космических аппаратов (рисунок 1.6).

Кроме того, на рисунках представлен широкий спектр других параметров (например, температур), при которых реализуется взаимодействие гетерогенных потоков с конструкцией. Например, на рисунке 1.2 струйно-абразивная обработка деталей машин осуществляется при нормальных (комнатных) температурах. На рисунке 1.5 процесс взаимодействия атмосферных жидких или твёрдых образований с поверхностью возвращаемого космического аппарата, совершающего вход в плотные слои атмосферы с гиперзвуковой скоростью, реализуется при очень высоких температурах – несколько тысяч градусов.

1.1.1. Использование гетерогенных потоков в пневмотранспорте и в струйно-абразивной обработке деталей конструкций

При движении наземного транспорта в запыленной атмосфере как твердыми, так и жидкими частицами [12], а также при эксплуатации магистралей пневмотранспорта [13] наблюдаются самые низкие скорости гетерогенных потоков – $V_p = 20 \div 50$ м/с (рисунок 1.1).

При струйно-абразивной обработке деталей машин уровень скоростей гетерогенных потоков достигает $V_p = 100 \div 140$ м/с, а углы соударения частиц о поверхность – $\alpha = 30 \div 90^\circ$ [14] (рисунок 1.2).

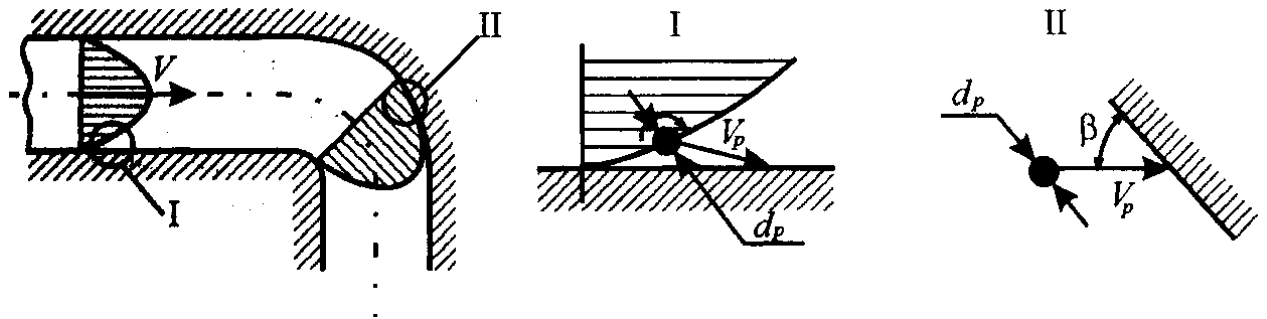


Рисунок 1.1. Схема взаимодействия твёрдых частиц угля при пневмотранспортировке газифицированного синтетического топлива

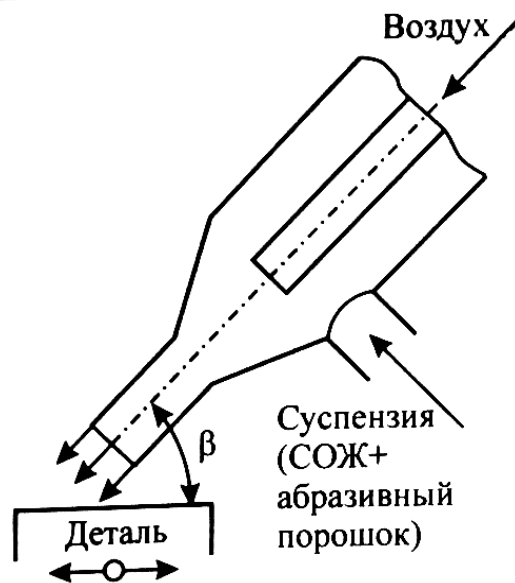


Рисунок 1.2. Схема струйно-абразивной обработки деталей машин

1.1.2. Использование гетерогенных потоков в авиационной и ракетной технике

Лопатки газотурбинных установок работают в более жестких условиях, так как скорость соударений жидких или твердых частиц о поверхность лопаток

достигает $V_p = 500 \div 700 \text{ м/с}$ при углах атаки частиц $\alpha = 0 \div 90^\circ$ (рисунок 1.3) [9, 15].

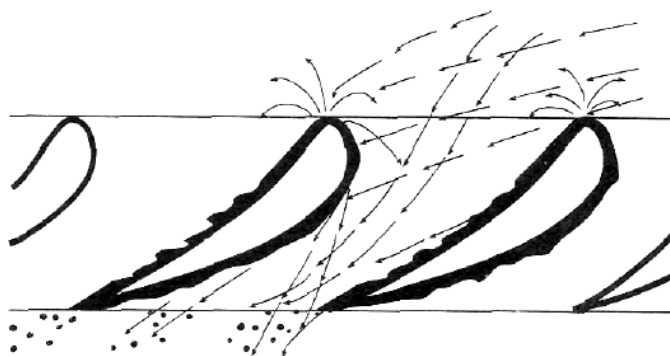


Рисунок 1.3. Схема взаимодействия потоков крупнодисперсных капель воды с сопловыми решётками паровых турбин

Ещё более интенсивно подвергаются воздействию гетерогенных потоков поверхности элементов конструкций воздушных летательных аппаратов: кромки воздухозаборников, винты вертолетов, лопатки турбореактивных двигателей и др. Скорости взаимодействия частиц с поверхностью в таких условиях могут достигать значений $V_p = 1000 \div 1200 \text{ м/с}$ при углах атаки $\alpha = 40 \div 90^\circ$.

При этом максимальный уровень температур газа-носителя в данных потоках таков, что материалы, из которых изготовлены элементы конструкций не разрушаются. В результате появления при полёте ЛА атмосферных образований, таких как дождь, снег, град, пыль возникает интенсивная эрозия элементов конструкции ЛА, которая может не только повлиять на режимные параметры аппаратов, но в ряде случаев значительно сократить ресурс их работы или даже вызвать аварийную ситуацию.

В ещё более жёстких условиях термоэрозионного воздействия гетерогенных высокотемпературных сверхзвуковых струй ракетных твёрдотопливных двигателей работают элементы сверхзвуковых сопел (рисунок 1.4) [16]: критическое сечение, стенки выходных устройств. Например, при взаимодействии гетерогенного потока со стенками в критическом сечении

уровень скоростей частиц в нем достигает значений $V_p = 1000 \text{ м/с}$ при температуре потока $T_g = 3500 \div 4000 \text{ К}$.

Кроме того, жидкие частицы окислов металлов, содержащиеся в топливе и достигающие в камере сгорания размеров до $d_p = 40 \div 50 \text{ мкм}$, при течении в критическом сечении сопла разрушаются до дисперсии $d_p \approx 4 \div 10 \text{ мкм}$. Скорости частиц в данных гетерогенных потоках на выхлопных кромках сверхзвуковых раструбов достигают значений $V_p = 2000 \div 2500 \text{ м/с}$ при статических температурах газа-носителя гетерогенного потока до $T_g = 1000 \div 1500 \text{ К}$ и углах взаимодействия частиц «К-фазы» со стенкой до $\alpha = 3 \div 8^\circ$.

Нахождение частиц гетерогенного потока в жидком состоянии в трансзвуковой части сопла может приводить к их осаждению и налипанию на внутреннюю поверхность каналов. При данном взаимодействии частица при отвердевании выделяет тепло, что приводит к дополнительному нагреву стенок данных каналов.

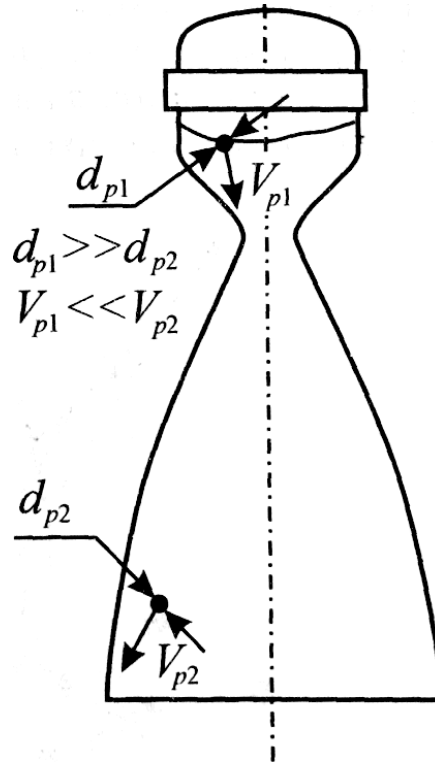


Рисунок 1.4. Схема взаимодействия со стенкой сопла жидких частиц окислов металлов, содержащихся в продуктах сгорания металлизированных топлив ЖРД и

РДТТ

Наиболее жестким условиям с точки зрения термоэрозионного воздействия подвергаются теплозащитные покрытия возвращаемых космических аппаратов, которые при полёте в атмосфере с гиперзвуковой скоростью преодолевают естественные атмосферные образования – облачность с частицами дождя, снега, льда (рисунок 1.5) [2]. При этом уровень траекторных параметров космических летательных аппаратов, таких как скорость, температура и давление, достигает экстремальных значений: $V_{\infty} = 5000 \div 7000 \text{ м/с}$, $T_0 \approx 5000 \div 7000 \text{ К}$, $P_0 \approx 1 \div 10 \text{ МПа}$ - соответственно. Задача усложняется, поскольку жидкие или твердые частицы размером от нескольких микрометров до нескольких миллиметров взаимодействуют с поверхностью аппарата в широком диапазоне углов атаки - от нескольких до 90 градусов. При таких режимах обтекания термоэрозионное разрушение теплозащитного покрытия (ТЗП) происходит со значительными скоростями, что, с одной стороны, вызывает изменение его аэродинамического профиля, а с другой - вызывает образование переменного температурного поля на его поверхности. В результате, частица при ударе взаимодействует с материалом, имеющим переменную во времени температуру. Поэтому с целью установления нестационарного температурного поля на поверхности аппарата, определяющего тепловое состояние поверхностного слоя и его термоэрозионную стойкость, приходится решать весьма сложную, многопараметрическую сопряжённую задачу.

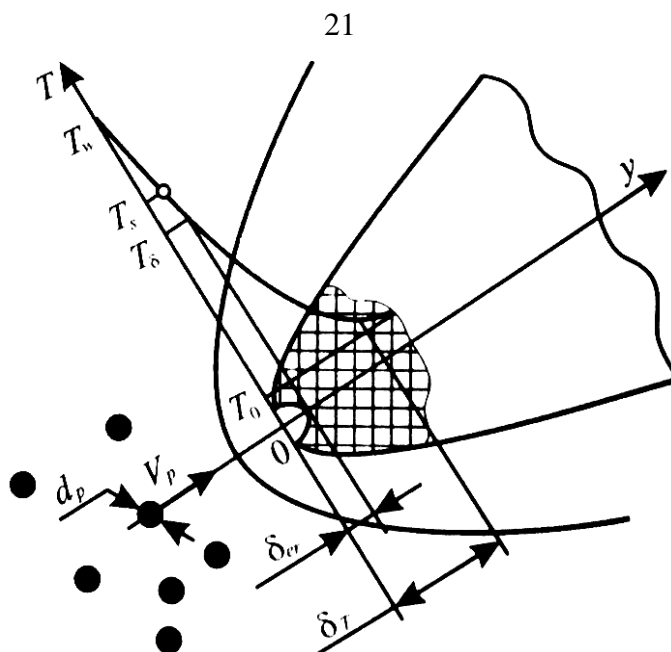


Рисунок 1.5. Схема взаимодействия частиц атмосферных образований с поверхностью спускаемых космических аппаратов

При столкновении в глубоком космическом пространстве космических летательных аппаратов (КЛА) с метеоритами реализуется наибольшая скорость (десятки км/с) соударения частиц с поверхностью элементов конструкции КЛА [17]. Вследствие инерционности процессов отвода тепла, удар частиц о поверхность тела с такой скоростью приводит к выделению на его поверхности колоссальных удельных энергий, что вызывает не только механическое (эрозионное) разрушение конструкции, но процессы интенсивного плавления и даже испарения её материала в области образующегося кратера. Это явление обусловлено соизмеримостью времени ударной трансформации кинетической энергии частиц в тепловую энергию поверхностного слоя со временем релаксации тепловых процессов в материале преграды [2].

При столкновении частицы с противометеоритной защитой космических летательных аппаратов, которая зачастую состоит из одного или нескольких тонких металлических экранов, происходит разрушение как частицы, так и экранов (рисунок 1.6). Частица при этом теряет кинетическую энергию.

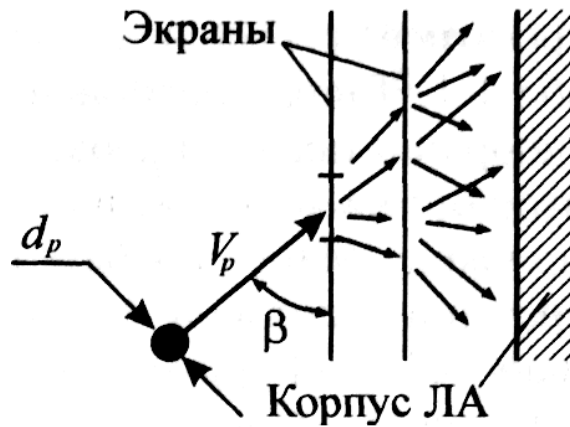


Рисунок 1.6. Схема взаимодействия микрометеорита с экранами противометеоритной защиты космических летательных аппаратов

1.1.3. Возможные диапазоны энергетических режимов частиц в гетерогенных потоках

Диаграмма, иллюстрирующая области взаимодействия гетерогенных потоков с поверхностью обтекаемых тел в зависимости от температуры набегающего потока и скорости соударения частиц, представлена на рисунке 1.7.

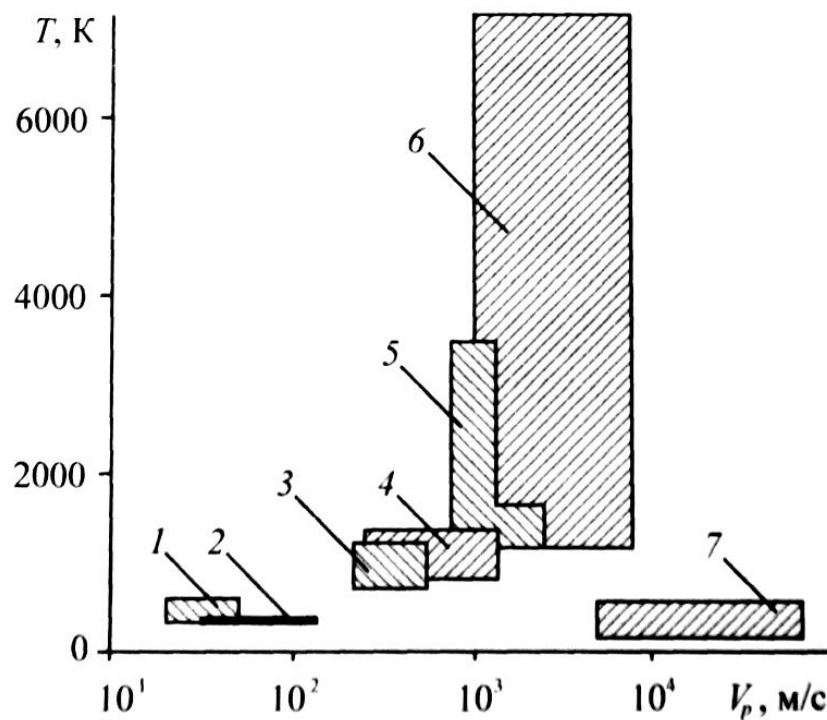


Рисунок 1.7. Диаграмма изменения температуры газа и скорости частицы для различных возможных устройств, систем и их элементов

Как уже отмечалось, особый интерес представляет область параметров, при которых поверхность конструкции подвергается интенсивной эрозии (разрушению).

Дополнительные параметры возможных вариантов взаимодействия гетерогенных потоков с поверхностями обтекаемых тел, такие как размеры частиц, их концентрации, агрегатное состояние, углы взаимодействия и т.д., сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Тип	Устройства, системы, их элементы	Возможные параметры воздействия гетерогенных потоков					
		V_p , м/с	d_p , мкм	Физическое состояние частиц	α , град	Массовая концентрация частиц, %	Температура газа-носителя T_g , К
1	Пневмотранспорт, в т.ч. газифицированного синтетического топлива	20 – 50	До 100	Твёрдые	До 90	До 2 - 3	500 – 600
2	Струйно-абразивная обработка деталей машин	30 – 150	5 – 500	Твёрдые СОЖ	0 – 90	До 35	300
3	Лопатки парогазотурбинных установок	500 – 700	До 1000	Твердые, жидкие	До 90	До 5	800 – 1200
4	Лобовые поверхности воздушных ЛА, кромки винтов вертолетов, воздухозаборников	1000 – 1200	До 1000	Твердые, жидкие	40 – 90	До 3	800 – 1200
5	Стенки каналов МГД-генераторов сопел ракетных двигателей на металлизированных топливах	До 1000 2000 – 2500	40 – 50 4 – 10	Жидкие Жидкие	До 45 До 10	До 40 До 40	3500 – 4000; 1000 – 1800
6	Лобовые поверхности ЛА, спускаемых в атмосфере с образованием в виде дождя, снега, льда (P' до 10 – 18 МПа)	До 7000	До 3000	Твердые, жидкие	До 90	До 5	5000 – 7000
7	Столкновение микрометеоритов с астероидами, малыми планетами и КА	До 100000	До 10	Твердые	До 90	Единичный удар	–

1.2. Моделирование гетерогенных потоков и их взаимодействие с элементами конструкций

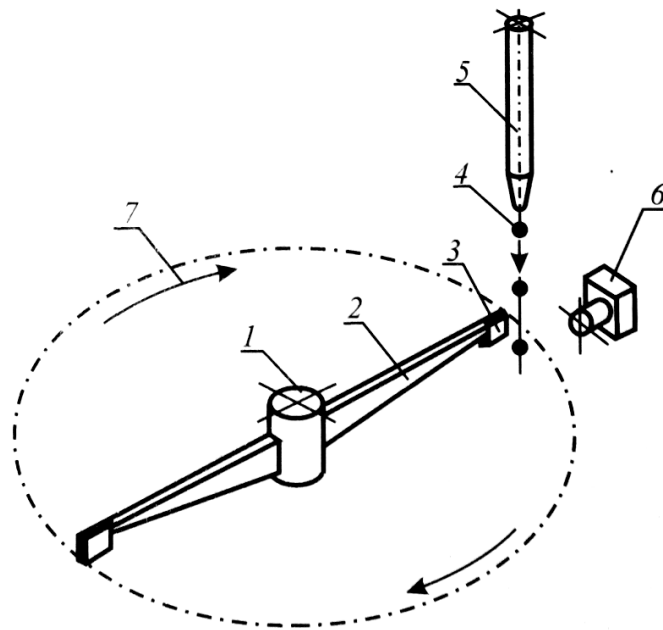
Возможности моделирования гетерогенных потоков в лабораторных условиях однозначно связаны с решением вышеуказанных проблемных задач.

1.2.1. Возможности моделирования гетерогенных потоков при решении задачи взаимодействия с элементами конструкции ракетной техники

Моделирование гетерогенных потоков с уровнями характерных параметров, соответствующими устройствам 1 и 2 типов (описанных выше в таблице 1.1), не представляет технических сложностей. Поэтому данная задача сводится к правильному выбору рабочих режимов [14, 18], а именно таких параметров как: скорость частиц в гетерогенном потоке, угол соударения, концентрация частиц, их характерный размер, их форма, их физико-механические свойства и др. Процесс моделирования производится на исследовательских стендах и, как правило, в широком диапазоне изменения параметров.

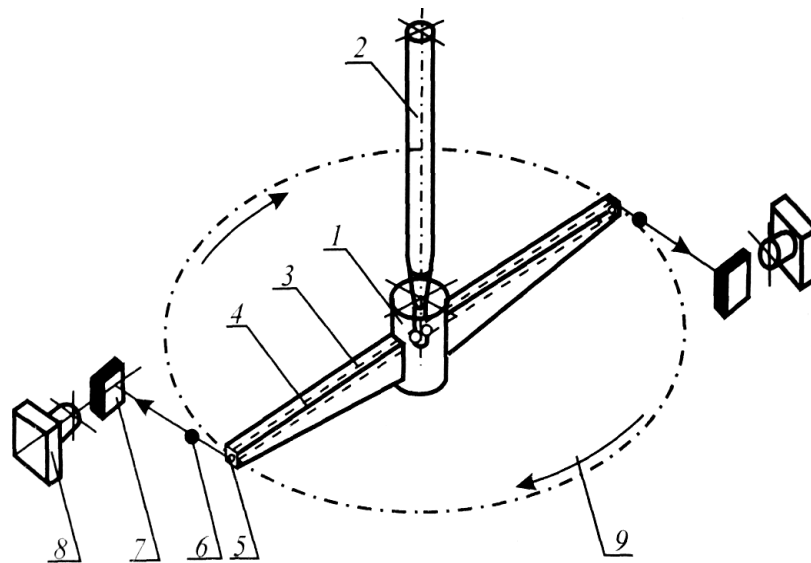
Воспроизведение характерных параметров на уровне устройств 3 и 4 типов (таблица 1.1) уже требует разработки специальных стендов. Наиболее подходящий и часто используемый вариант – это центрифуги [9, 18], так как являются наиболее простыми в эксплуатации установками. Существует два вида данных установок:

- центрифуги, в которых модель исследуемого объекта вращается на коромысле (рисунок 1.8);
- центрифуги, в которых частицы разгоняются центробежными силами и соударяются с образцами, установленными на внутренней поверхности барабана центрифуги (рисунок 1.9).



1 – ось с электродвигателем, 2 – коромысло, 3 – образец, 4 – жидкая или твердая частица, 5 – питатель, 6 – регистрирующая аппаратура, 7 – направление вращения

Рисунок 1.8. Схема стенда с использованием вращения исследуемых образцов



1 – ось с электродвигателем, 2 – питатель, 3 – коромысло, 4 – канал для подвода частиц к форсунке, 5 – форсунка, 6 – частица, 7 – образец, 8 – регистрирующая аппаратура, 9 – направление вращения

Рисунок 1.9. Схема стенда с использованием центробежного ускорения частиц

Установки по типу центробежные ускорители дают надежные и устойчивые результаты до скоростей $V=200 \div 500$ м/с. Они могут достаточно точно моделировать необходимые уровни основных параметров, таких как: скорость и

угол взаимодействия, размер, форму и физическое состояние воздействующих частиц.

При использовании указанной на рисунке 1.9 установки следует иметь в виду, что вращение ротора создаёт поток газа, в рабочей камере центрифуги. В этой связи траектории движения частиц искажаются. Для устранения этого эффекта рабочую камеру вакуумируют.

Также, следует иметь в виду, что частицы, ускоряясь внутри радиальных каналов ротора, соударяются со стенками ротора под воздействием сил Кориолиса и дробятся на более мелкие фракции. Еще одним недостатком данного типа установок является сложность подогрева исследуемого объекта.

К недостаткам также можно отнести невозможность моделирования на стендах данного типа газодинамики течения газа вблизи передней лобовой точки ЛА.

Воспроизведение характерных параметров процессов взаимодействия продуктов сгорания металлизированных топлив с поверхностями стенок сопел ракетных двигателей и крупноразмерных каналов МГД-генераторов (позиция 5 таблицы 1.1), как правило, осуществляется на стендах, которые являются маломасштабной копией реальной установки (возможно некоторое упрощение). Однако некоторые особенности данных процессов, связанные с масштабным фактором (например, «жгутование» частиц в потоке), могут быть изучены только на полномасштабных установках.

Наличие верхнего предела энергетических возможностей наземных установок ограничивает уровни воспроизводимых характерных параметров гетерогенных потоков. По этой причине нет возможности для проведения в полном объеме моделирования спуска в атмосфере ЛА на земле. Также невозможно и исследование отработки материалов и элементов конструкции в летных испытаниях.

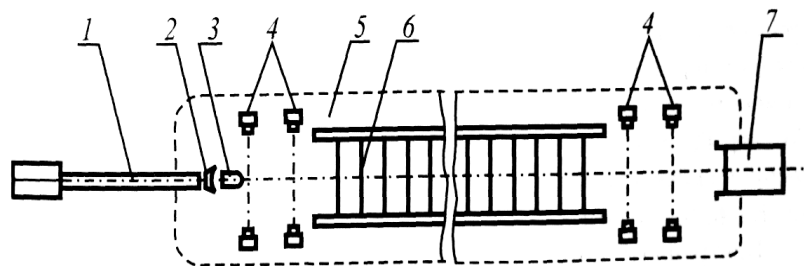
Данными причинами, а также вследствие многофакторности исследуемого процесса, объясняется существование испытательных стендов, основанных на использовании различных физических принципов.

Использование таких установок позволяет исключить систематические погрешности, а также изучить механизмы разрушения материалов и степени влияния отдельных факторов на эти механизмы.

В связи с вышесказанным, проведём анализ принципиальных особенностей некоторых типов испытательных стендов: баллистических, центробежных, газодинамических.

Для изучения процесса эрозионного разрушения при взаимодействии поверхности исследуемого объекта с гетерогенными потоками, содержащими дождевые образования и крупные твердые частицы ($d_p > 0,5$ мм), чаще всего используют баллистические установки или установки прямого воздействия [19, 20]. Данные установки есть не что иное, как метательные системы с баротрассой и регистрирующей аппаратурой.

Принцип работы баллистической установки с прямой схемой воздействия состоит в том, что модель исследуемого объекта, ускоряется с помощью пушки, затем преодолевает последовательно зону с измерительной аппаратурой, зону, в которой моделируется гетерогенная среда, снова попадает в зону с измерительной аппаратурой, а затем в систему улавливания модели (рисунок 1.10). Данное моделирование является наиболее приближенным к реальным условиям, в которых функционируют исследуемые объекты. Значительным недостатком данного типа стендов является невозможность точной оценки интенсивности эрозионного разрушения. Данная проблема возникает из-за несовершенства систем улавливания, которые и вносят большие погрешности.

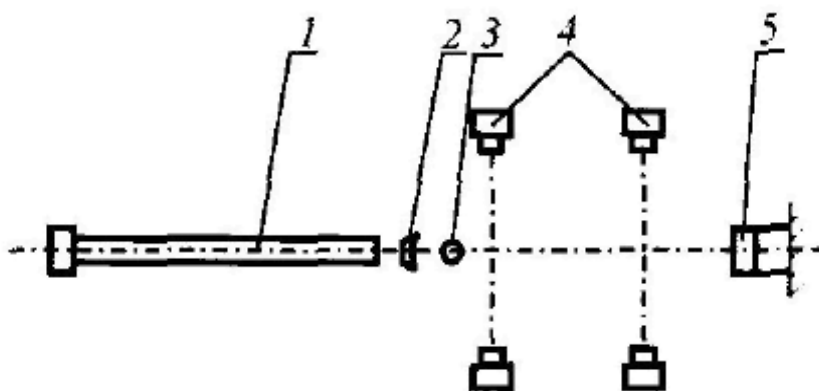


1 – пушка, 2 – поддон, 3 – модель, 4 – системы измерения скорости модели, 5 – барокамера, 6 – имитаторы жидких или твердых частиц, 7 – уловители модели

Рисунок 1.10. Схема баллистического стенда с подвижной моделью

Одним из основных, и в тоже время наиболее серьезных недостатков баллистических установок является снижение скорости выстреливаемой модели вследствие влияния на нее силы сопротивления среды. Для уменьшения аэродинамического торможения исследуемой модели вдоль траектории ее движения баллистические трассы вакуумируют. Однако данный способ снижает, и аэродинамический нагрев, что, в свою очередь, исключает возможность изучения процессов совместного теплового и эрозионного воздействия гетерогенного потока на модель. Также к основным недостаткам данного типа установок относят малое время испытания.

Принцип работы баллистической установки при обращенной схеме воздействия (рисунок 1.11) заключается в том, что испытуемая модель неподвижна, а частицы, изначально закрепленные на поршне, ускоряются вместе с ним в стволе станда. В конце разгонного участка поршень резко тормозится, частицы отрываются от него и продолжают движение по инерции до столкновения с исследуемой моделью. Для уменьшения аэродинамического торможения частиц также применяется вакуумирование баротрассы, что приводит к исключению возможности изучения процессов совместного теплового и эрозионного воздействия гетерогенного потока на модель.



1 – пушка, 2 – поддон, 3 – частица или сгусток частиц, 4 – система измерения скорости частицы, 5 - модель

Рисунок 1.11. Схема баллистического стенда с высокоскоростными частицами

Существует множество методов предварительного нагрева, перечислим основные: радиационный, электронным или лазерным лучом, омический и т.д. Но все они обладают данными недостатками:

- 1) так как при предварительном нагреве до температур свыше $T=450\div 550\text{ K}$ происходит термодеструкция органического связующего и исследование термоэрозионной стойкости происходит не в штатном режиме, они не позволяют исследовать композиционные материалы на органическом связующем;
- 2) невозможность моделирования высоких штатных значений градиента температуры в поверхностном слое исследуемой модели.

Для изучения механизма эрозионного разрушения материалов и их свойств нашли также применение, так называемые, «ракетные трассы» [20]. На таких стендах исследуемые модели разгоняются вдоль монорельса, например, ракетным двигателем, затем попадают в зону моделирования эрозионного воздействия после чего тормозятся.

К основным недостаткам данного вида стендов относят:

- 1) ограничение по максимальной скорости по причине возникновения проблем торможения и спасения исследуемой модели;
- 2) конечные размеры длины трассы, соответственно, и значительное уменьшение времени испытания.

Перечисленные недостатки не позволяют использовать «ракетные трассы» для решения задач термоэрозионных исследований.

Следующий тип стендовых установок – газодинамические стенды. Они являются установками обращенного воздействия. Основной принцип работы газодинамического стенда заключается в том, что исследуемая модель взаимодействует с высокотемпературным гетерогенным потоком, который получается в результате ускорения газом-носителем в сопловом тракте твердых тугоплавких частиц. Частицы заданной дисперсности с определенным расходом вводятся в форкамеру газогенератора, а испытуемый объект располагается по оси высокотемпературного гетерогенного потока. В случае применения сверхзвукового гетерогенного потока перед исследуемой моделью

образуется отошедшая головная ударная волна. Параметры высокоскоростного гетерогенного потока, а именно частиц и газа-носителя, (гетерогенного потока), обтекающего поверхность испытуемой модели, имитируют штатные условия работы изделия. [2]

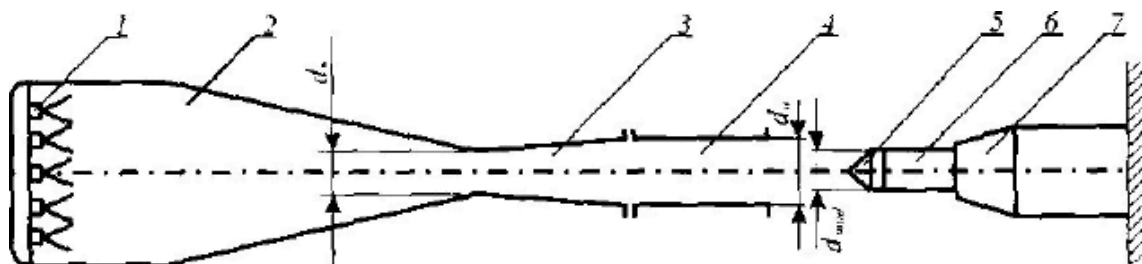
Приведем различные схемы высокотемпературных газодинамических стендов с химическим подогревом рабочего тела:

- на жидких или газообразных компонентах топлива (рисунок 1.12);
- с использованием твердого топлива (рисунок 1.13);
- с электродуговым подогревом (рисунок 1.14).

Через равномерно расположенные форсунки в форсуночном днище жидкие и газообразные топливные компоненты, а также тугоплавкие частицы могут вводиться в форкамеру. Затем образуемый гетерогенный поток разгоняется в сопловом тракте. Исследуемый объект располагается на оси экспериментальной установки на определенном расстоянии от среза сопла.

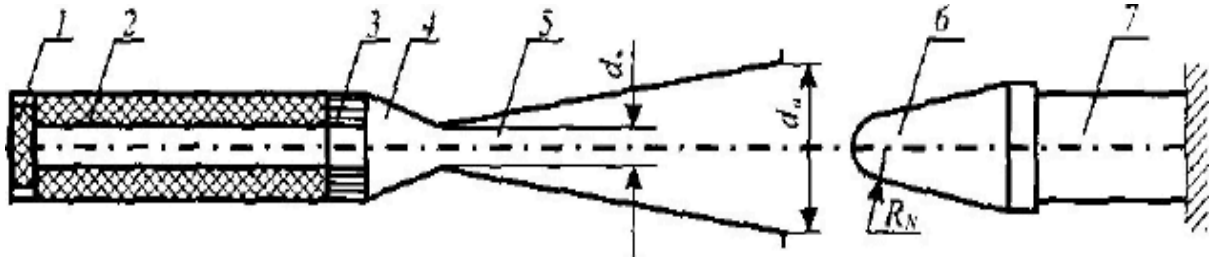
В твердое топливо частицы могут подмешиваться непосредственно при его изготовлении.

На экспериментальных установках с электродуговым подогревом газа зачастую используют плазмотроны с вихревой стабилизацией дуги. Недостатком данного метода является неравномерность распределения частиц по потоку из-за воздействия на них центробежных сил. Поэтому зачастую на данных стендах, перед тем как частицы вводятся в поток, они попадают в специальные успокоительные камеры.



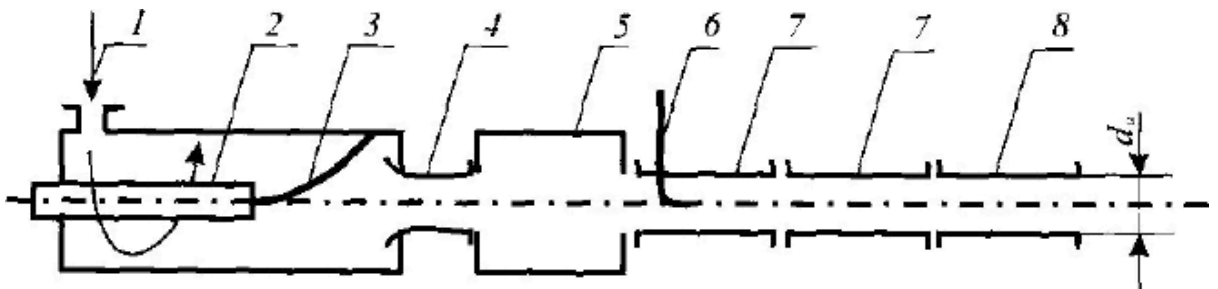
1 – форсунки для ввода химических компонентов и частиц, 2 – форкамера, 3 – сопло, 4 – цилиндрическая насадка, 5 – защитный наконечник, 6 – образец изучаемого материала, 7 – державка

Рисунок 1.12. Схема стенда с химическим подогревом на основе жидких или газообразных компонентов для создания высокотемпературных гетерогенных потоков



1 – воспламенитель, 2 – твердый компонент (может содержать тугоплавкие частицы), 3 – устройство для ввода в поток тугоплавких частиц, 4 – форкамера, 5 – сопло, 6 – модель, 7 – державка

Рисунок 1.13. Схема стенда с химическим подогревом на основе твердых компонентов для создания высокотемпературных гетерогенных потоков



1 – ввод рабочего газа, 2 – катод, 3 – дуга, 4 – сопло, 5 – успокоительная секция, 6 – ввод тугоплавких частиц, 7 – дополнительные секции, 8 – диагностическая секция

Рисунок 1.14. Схема стенда с электродуговым подогревом газа

Газодинамические стенды позволяют моделировать стационарные условия воздействия, что является их основным достоинством. Данный факт особенно значим при исследовании следующих задач:

- оценка теплового воздействия гетерогенного потока;
- исследование механизмов разрушения и изменения формы испытуемого объекта;

- изучение влияния теплофизических и теплопрочностных характеристик материала испытываемого объекта и частиц на скорость эрозионного разрушения.

Главный недостаток газодинамических стендов кроется в принципе работе данной установки, а именно в воздействии высокоэнергетического потока газоносителя на частицы. Вследствие чего частицы нагреваются, соответственно, могут ухудшиться их прочностные характеристики, частицы могут оплавиться и даже разрушиться (испариться).

Кроме того, различная инерционность крупных и мелких частиц осложняет использование газодинамического принципа разгона полидисперсных смесей.

Также существуют ограничения по максимальному размеру частиц при необходимости их ускорения до сверхзвуковых скоростей [2]:

- максимальный размер твёрдых частиц в зависимости от мощности стенда составляет $0,7 - 2,54$ мм;
- максимальный размер жидких частиц, вследствие их разрушения при больших числах Вебера в критическом сечении разгонного тракта, $4 - 10$ мкм.

На газодинамических стендах удобно реализовывать последовательный (раздельный) метод теплового и эрозионного воздействия на исследуемые образцы. Например, термохимическое разрушение материалов можно проводить путём предварительного нагрева газа до необходимой температуры и воздействовать таким потоком на исследуемый образец. Далее, получив таким образом характеристики термохимического разрушения материала, образец того же материала можно испытать при воздействии высокоскоростным гетерогенным потоком, включающим твёрдые частицы. По результатам проведенных испытаний определяются параметры как термохимического, так и термоэрозионного разрушения исследуемого материала.

Газодинамические стенды также позволяют воспроизводить тепловое и эрозионное разрушение исследуемого образца одновременно. Одним из таких примеров является газодинамическая установка, где частицы разгоняются легким газом в специальном сопле [22]. А основной высокотемпературный поток

газа-носителя создается плазматроном. Затем разогнанные частицы вводятся в основной поток газа-носителя в районе среза сопла плазматрона. Далее полученный гетерогенный поток воздействует на испытываемую модель.

Применение подобных стенов ограничивает их сложность как конструктивная, так и сложность в получении гетерогенного потока с определенными параметрами. Конструктивная сложность заключается в необходимом наличии двух газогенераторов. Параметры гетерогенного потока определяются на этапе перемешивания двух потоков. Проблема организации данного процесса связана с тем, чтобы отсечь струю легкого газа, который разгоняет частицы, не допустить сепарации частиц полидисперсного состава, исключить угол между направлением движения частиц, осью высокотемпературного газового потока и осью образца испытываемого материала [2].

Также к недостаткам данного типа стенов следует отнести то, что частицы слабо нагреваются, так как вводятся в область с низкой статической температурой основного потока газа-носителя.

Наличие такого количества недостатков практически исключило применение в настоящее время данных стенов для исследования термоэрозионной стойкости материалов.

На данный момент более простыми и популярными типом экспериментальных установок для изучения взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с поверхностью исследуемого объекта являются газодинамические установки с электродуговыми нагревателями [23], либо химическими газогенераторами. На данных стендах в качестве частиц используются тугоплавкие окислы, которые вводятся в форкамеру установок.

К основным достоинствам газодинамических установок с электродуговыми нагревателями можно отнести:

- высокоэнтальпийность создаваемого гетерогенного потока;
- большое время работы на стационарном режиме;
- дешевизна эксплуатации.

Все вышеперечисленное дает возможность для исследования термохимических и термоэрозионных характеристик материалов, но только на малоразмерных моделях. Так как создаваемые гетерогенные потоки на газодинамических установках с электродуговыми нагревателями имеют небольшие поперечные сечения.

С помощью газодинамических установок с химическими газогенераторами, созданных у нас с использованием углеводородного [24] и за рубежом – кислородо-водородного жидкого топлива [25], можно исследовать модели любых размеров. В отличие от установок на твердом топливе, данные стенды отличаются возможностью независимого изменения параметров, которые определяют тепловое состояние изучаемых моделей. К таким параметрам относятся температура, давление, химический состав продуктов сгорания, расход и размер частиц. Основным недостатком является сложность данных стендов.

Газогенераторы, используемые для генерации высокотемпературных гетерогенных потоков, с целью моделирования процессов термоэрозионного воздействия на исследуемые объекты, также применяются непосредственно для термоэрозионного разрушения. Примерами данной практики являются: разработка скважин, карьеров, проходка тоннелей в горных породах и т.д. При этом рабочие режимы данных установок лежат в диапазоне характерных параметров для химических газогенераторов, поэтому подробно рассмотрены не будут.

Из проведенного анализа следует, что для моделирования сложных процессов термоэрозионного разрушения материалов для элементов конструкции высокоскоростных ЛА, следует использовать сверхзвуковые высокотемпературные стенды с генерацией гетерогенных потоков.

В МАИ был разработан низкотемпературный газодинамический метод (НТГДМ) создания высокоскоростного гетерогенного потока. Основным отличием НТГДМ от других методов является низкая энтальпия (температура) газа-носителя (до 700К), что способствует слабому нагреву твердых частиц в гетерогенном потоке (менее 10% от температуры плавления материала частиц).

Данный факт исключает химические реакции между газом-носителем и твердыми частицами. Также необходимо отметить, что образование гетерогенного потока происходит при высоких скоростях газа-носителя - 500...1500 м/с.

На основе НТГДМ-технологии в МАИ был комплекс уникальных стенов [1], позволяющий проводить исследования в области влияния гетерогенного потока на различные материалы (рисунок 1.15).

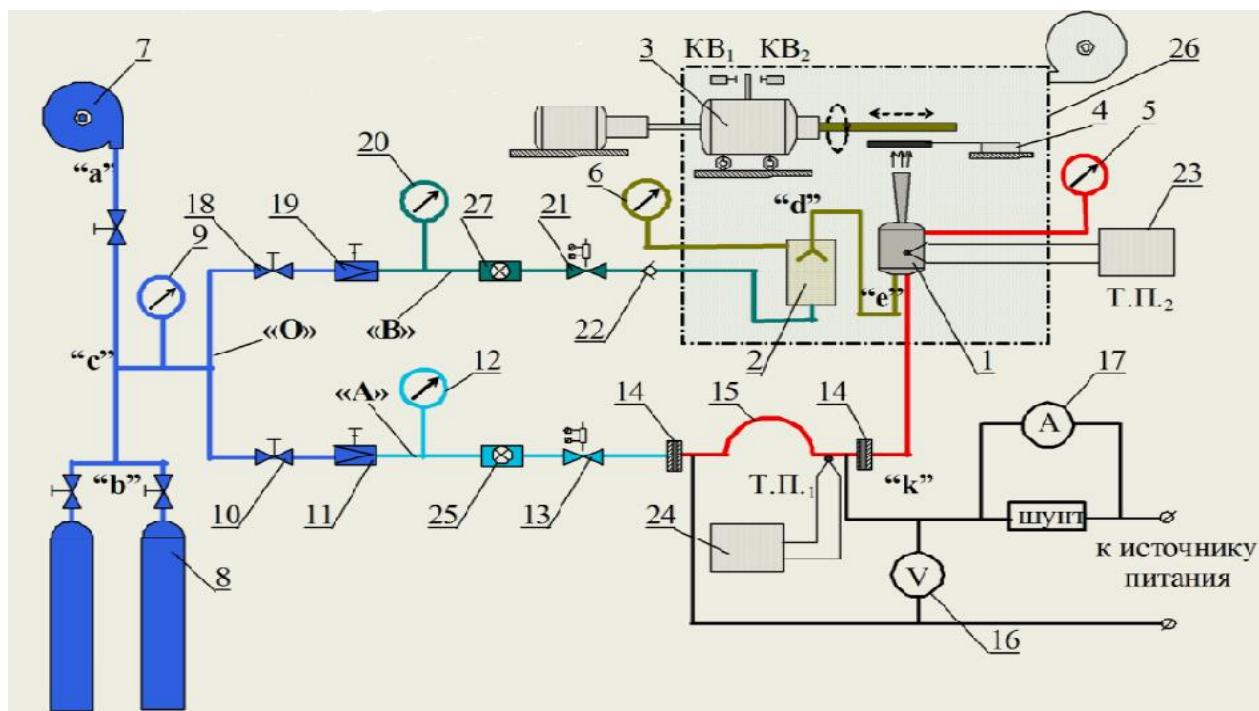


Рисунок 1.15. Принципиальная схема стенов лабораторного типа на основе НТГДМ-технологии

Принципиальная схема установки состоит из следующих агрегатов и узлов [1]:

- камера смешения с сопловым блоком (1) предназначена для смешивания дозы порошка, выданной дозатором (2) и газом-носителем, прошедшим через нагреватель (15). Камера смешения и сопловой блок соединены механически. Это позволяет проводить смену сопловых блоков;

Это позволяет проводить смену сопловых блоков;

- дозатор частиц эжекторного типа (2) подачи частиц;
- координатное устройство (3) продольного и вращательного типа;
- электромеханическая заслонка (4);

- манометр (5) контроля давления в камере смешения (1);
- манометр (6) контроля давления в устройстве подачи частиц (2);
- компрессор (7);
- баллоны (8) сжатого газа (баллонная рампа), используется в качестве накопителя сжатого газа и рессиверных емкостей. Рессиверные емкости необходимы для устранения пульсаций давления сжатого газа, возникающих при работе компрессора;
- манометр (9) контроля давления в общей магистрали («О»);
- запорные вентили (10, 18) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В») – стандартные;
- понижающие редукторы давления (11, 19) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В»);
- манометры (12, 20) контроля давления в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В»);
- электропневмоклапаны (13, 21) в магистрали основного расхода газа («А») и магистрали системы подачи частиц («В») - стандартные. Представляют собой нормально закрытые клапаны, которые открываются при подаче электрического тока на электромагнитные соленоиды;
- электроизоляционные муфты электрического нагревателя газа-носителя (14) предназначены для электроизоляции омического нагревателя (15) от пневмосистем стенда. Изготавливаются в виде фланцев из нержавеющей стали, разделенных электроизолятором (как правило, керамическим);
- омический нагреватель газа-носителя (15) выполняется в форме спирали (змеевика) из трубки нержавеющей стали;
- вольтметр (16) с пределами измерения, которые должны быть согласованы с регулируемым источником питания омического нагревателя газа-носителя (15) (предположительно пределы измерения вольтметра должны быть 0...300 В) – стандартный;
- амперметр (17) с пределами измерения, которые должны быть согласованы с регулируемым источником питания омического нагревателя газа-

носителя (15) (предположительно пределы измерения амперметра должны быть 0...1000 А) – стандартный;

- обратный клапан (22) в магистрали системы подачи частиц («В») - стандартный. Обратный клапан позволяет перетекать газу только в одном направлении (от магистрали «О» к выходу из магистрали «В»). Обычно исполнительным механизмом обратного клапана является шар, который прижимается пружиной к седлу клапана;

- регистраторы температуры (23, 24) – стандартные;

- измерители массового расхода газа (25) и (27) (при необходимости),

- вентиляционная система (26) должна обеспечивать две функции:

а) улавливать с помощью фильтров частицы порошка;

б) обеспечить частичное шумоглушение в процессе работы установки;

Общая магистраль высокого давления («О») начинается от компрессора (7) и баллонов сжатого газа (8), а заканчивается перед редукторами (11 и 19). Магистраль основного расхода газа «А» начинается от редуктора (11) и заканчивается перед камерой смешения с сопловым блоком (1) (точка «е»). Магистраль системы подачи частиц «В» начинается от редуктора (19) и заканчивается перед камерой смешения с сопловым блоком (1) (точка «е»).

1.3. Газодинамика гетерогенных потоков

Неотъемлемой чертой гетерогенных потоков является взаимное влияние несущей и дисперсной фаз друг на друга. Большое количество параметров гетерогенных потоков зависят от разницы между скоростями газа-носителя и частиц – скоростного скольжения фаз $|V - V_p|$. В силу инерционности дисперсной фазы ее скорость может, как превышать скорость несущей фазы $V < V_p$, так и быть меньше $V > V_p$. Величина инерционности в свою очередь зависит от размера частиц и от плотности материала частиц: чем больше размер частиц и плотность материала, тем они более инерционны.

Полностью определить состояние гетерогенной смеси в конкретный момент времени можно лишь задав координаты и скорости всех частиц. Данная задача сложна для решения при рассмотрении гетерогенного потока с большой концентрацией частиц, так как любое взаимодействие частиц между собой или с преградой влечет за собой изменение траектории и скорости полета. Для определения параметров данного изменения необходимо знать законы обмена импульсом и формы частиц. Для решения данной проблемы Рахматуллин Х.А. предложил использовать концепцию взаимопроникающих континуумов [26], которая основывается на следующих допущениях:

- каждый из таких континуумов соответствует определенной фазе (газообразной или конденсированной) и характеризуется в каждой точке пространства средним значением плотности - ρ или ρ_{vp} , скорости - V или V_p и температуры – T или T_p .
- внутри континуума частиц отсутствует их прямой контакт друг с другом, а все их поведение описывается некими осредненными условиями взаимодействия несущей и дискретной фаз. В качестве аргумента в условия взаимодействия входит скоростное и температурное скольжение фаз: $|V - V_p|$ и $|T - T_p|$;
- функциональный вид условий взаимодействия двух взаимопроникающих континуумов принимается тем же, что и законы сопротивления и теплообмена между бесконечным равномерным потоком и телом, имеющим ту же форму, что и типовая частица.

Данные допущения необходимо принять, поскольку для решения данной задачи в реальной постановке:

- во-первых, необходимо знать коэффициенты сопротивления и теплообмена;
- во-вторых, появляется необходимость учета траектории и столкновения каждой частицы индивидуально.

При натекании гетерогенного потока на преграду вблизи ее поверхности газ-носитель воздействует на частицу несимметрично. Для учета данного явления

применяются «законы стенки» или учитывается термофорез внутри теплового пограничного слоя. Данные добавки необходимо учитывать для определенных размеров частиц, и то их вклад незначителен.

Для определения границ применения принятых допущений рассмотрим экспериментальные работы, проведенные американскими исследователями и представителями Сибирского отделения РАН.

Американские ученые провели простой, но в тоже время наглядный эксперимент [27]. Целью эксперимента было оценивание величины взаимного влияния сферических частиц при их свободном падении в емкости с этиленгликолем или водой (рисунок 1.16). На изменении траектории движения частиц, то есть когда траектория частицы отличалась от вертикальной прямой, могли повлиять вихревые следы, которые образовывались за другими, падающими ранее частицами. Частицы подавались через верхнюю крышку емкости, при подаче можно было регулировать расстояние между частицами в диапазоне $l_p = 1,36 \div 12d_p$. Также в эксперименте варьировалась скорость падения частиц $V_p = 0,12 \div 073 \text{ м/с}$, соответственно, и изменялось число Рейнольдса в диапазоне $Re_p = 50 \div 1500$.

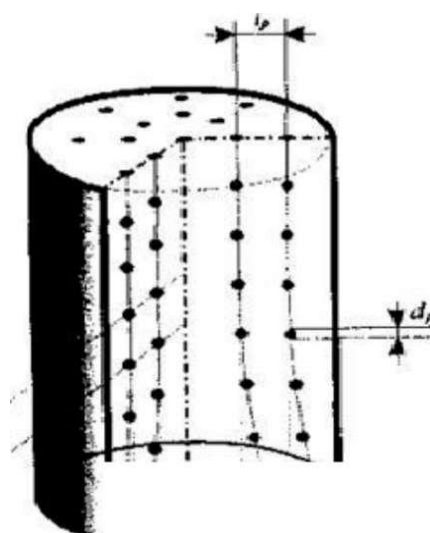


Рисунок 1.16. Схема эксперимента по изучению степени рассеивания частиц

Примеры полученных результатов эксперимента:

- $Re_p = 50$: влияние не обнаружено во всем диапазоне l_p/d_p ;
- $Re_p = 380$: влияние обнаружено при $l_p/d_p \leq 4$;
- $Re_p = 1500$: незначительное влияние за пределами расстояний между частицами $l_p/d_p \geq 8$.

Из проведенного анализа результатов эксперимента можно сделать следующий вывод: влияние частиц друг на друга обнаруживалось только при высоких числах Рейнольдса Re_p и небольших расстояниях между частицами l_p/d_p .

Необходимо отметить, что вихревые следы за сферическими частицами образуются при числах $Re_p \geq 150$. Длина данного следа при высоких числах Рейнольдса может достигать величины в 100 калибров: $L = 100d_p$. Для влияния на частицу размер вихревого образования должен быть соизмерим с размером частицы, либо с толщиной пограничного слоя, образовавшегося на поверхности частицы.

На рисунке 1.17 приведена диаграмма в координатах $l_p/d_p - Re_p$. На ней изображены границы областей с присутствием и отсутствием влияния частиц друг на друга. Необходимо заметить, что число Рейнольдса рассчитано по скоростному скольжению фаз $|V - V_p|$, соответственно, данная величина зависит от размера частиц d_p и плотности материала ρ_p .

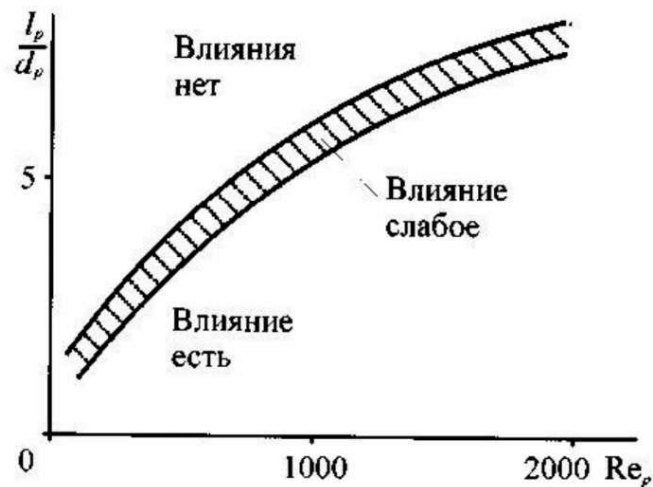


Рисунок 1.17. Области с присутствием и отсутствием влияния частиц друг на друга

Основным выводом из данного эксперимента является то, что влияние частиц друг на друга в гетерогенном потоке короткодействующее и его необходимо учитывать при превышении объемной концентрации частиц некоторого порогового значения $\beta_p > \beta_p^*$, которое, в свою очередь, зависит от относительного расстояния: $\beta_p \sim (l_p/d_p)^3$.

В эксперименте, который проводился в сибирском отделении РАН, гетерогенный поток протекал в сверхзвуковом сопле [28]. Использование различных материалов для частиц: бронза, ликоподий и органическое стекло – дало возможность изменять плотность распределения частиц в гетерогенном потоке: $\rho_{vp} = \beta_p \rho_p$, где β_p – объемная концентрация, ρ_p – плотность материала частиц. Форма частиц также, как и у американских исследователей, была сферической.

В данном эксперименте в качестве оцениваемого параметра являлась скорость, которая с помощью лазерно-доплеровской анемометрии измерялась как для газа-носителя, так и для дискретной фазы. Измерение скорости происходило в расширяющейся части сверхзвукового сопла.

На рисунке 1.18 представлены результаты, полученные для частиц из органического стекла.

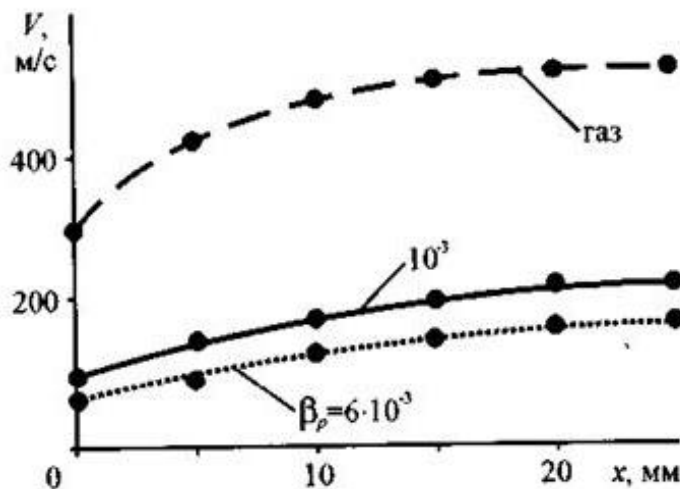


Рисунок 1.18. Влияние объемной концентрации β_p частиц из органического стекла на изменение скорости газа-носителя и дискретной фазы

Из анализа результатов, представленных на рисунке 1.18 видно, что изменение объемной концентрации β_p частиц из органического стекла никак не сказалось на скорости газа-носителя.

На рисунке 1.19 представлены результаты, полученные для частиц из бронзы.

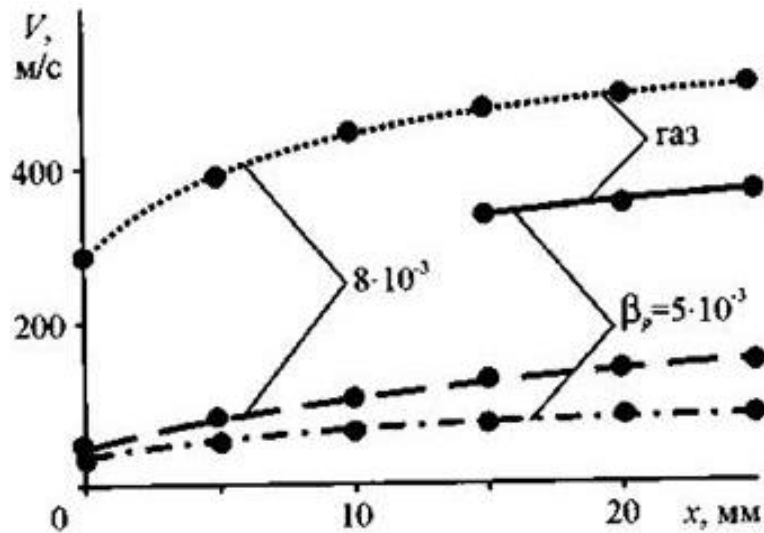


Рисунок 1.19 Влияние объемной концентрации β_p частиц из бронзы на изменение скорости газа-носителя и дискретной фазы

Из анализа результатов, представленных на рисунке 1.19 видно, что изменение объемной концентрации β_p частиц из бронзы повлияло как на скорость газа-носителя, так и на скорость самих частиц: с увеличением объемной концентрации с $\beta_p = 8 \cdot 10^{-4}$ до $\beta_p = 5 \cdot 10^{-3}$ скорости газа-носителя и частиц снизились.

Основным выводом из данного эксперимента является величина порогового значения объемной концентрации частиц $\beta_p^* = 10^{-3}$. То есть до этого значения отсутствует влияние изменения объемной концентрации частиц на параметры газа-носителя и самих частиц.

Полученные результаты американских исследователей и исследователей из сибирского отделения РАН хорошо согласуются между собой, так как пороговое значение объемной концентрации $\beta_p^* = 10^{-3}$ соответствует значению

относительного расстояния между частицами $l_p/d_p = 10$, полученного американскими учеными для больших чисел Рейнольдса. Как говорилось выше, данные величины и отражают границы применимости модели взаимопроникающих континуумов.

Необходимо отметить, что для веществ с меньшей плотностью пороговые значения данных параметров могут быть больше в несколько раз.

1.4. Силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу

Существует три вида сопротивления среды, которые зависят от характера движения тела через среду:

- деформационное, или вязкостное сопротивление – сила деформации среды, необходимая для прохождения в ней тела. Данная деформация может происходить на больших расстояниях от тела впереди и сзади него;
- сопротивление трения на поверхности тела;
- сопротивление давления, обусловленное сжатием среды.

При малых числах Рейнольдса ($Re \ll 1$) преобладает деформационное сопротивление.

Для практических задач, связанных с движением частиц в стационарном потоке, основной силой, действующей на частицу, является сила аэродинамического сопротивления:

$$F_p = 1/2 \cdot C_D \cdot S_p \cdot \rho \cdot |V - V_p| \cdot (V - V_p), \quad (1.1)$$

где C_D – коэффициент сопротивления, S_p – площадь миделевого сечения частицы, ρ – плотность газа-носителя.

Сила аэродинамического сопротивления возникает при обдуве частиц газом-носителем. Данная сила пропорциональна разности абсолютных скоростей газового потока и частиц $|V - V_p|$. Дисперсная фаза ускоряется несущим потоком в том случае, когда данная разность больше 0, то есть скорость дисперсной фазы меньше, чем скорость газа.

Влияние остальных сил незначительно.

Также необходимо отметить, что все особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока заложены в коэффициенте сопротивления C_D . Для его определения необходимо решить фундаментальную систему уравнений Навье-Стокса, которая состоит из уравнений сохранения массы, количества движения, энергии для газа-носителя, обтекающего частицы определенной формы. К сожалению, решение данной системы уравнений получено только для конкретных частных случаев.

Для получения аналитических решений системы уравнений Навье-Стокса принимались следующие допущения:

1. Объемная концентрация частиц в потоке ниже порогового значения, то есть частицы не оказывают влияния друг на друга.
2. Масштаб пространственного изменения поля скоростей газа-носителя много больше размера дисперсной фазы, то есть в каждый данный момент времени частица движется в однородном потоке.
3. Форма частиц сферическая, что дает возможность не рассматривать вращение частицы относительно своего центра масс.

Для диапазона чисел Рейнольдса $Re_p < 0,5$ коэффициент сопротивления принято рассчитывать по формуле Стокса [2]:

$$C_D = 24/Re_p, \quad (1.2)$$

где Re_p – число Рейнольдса, рассчитанное по скоростному скольжению фаз ($V - V_p$) и диаметру частиц d_p - $Re_p = \rho (V - V_p) d_p / \mu$, где μ - динамический коэффициент вязкости газа-носителя.

Для значений чисел $Re_p > 0,5$ применяется какая-либо аппроксимация стандартной кривой сопротивления $C_D(Re_p)$ для сферических и цилиндрических частиц (рисунок 1.20) [29].

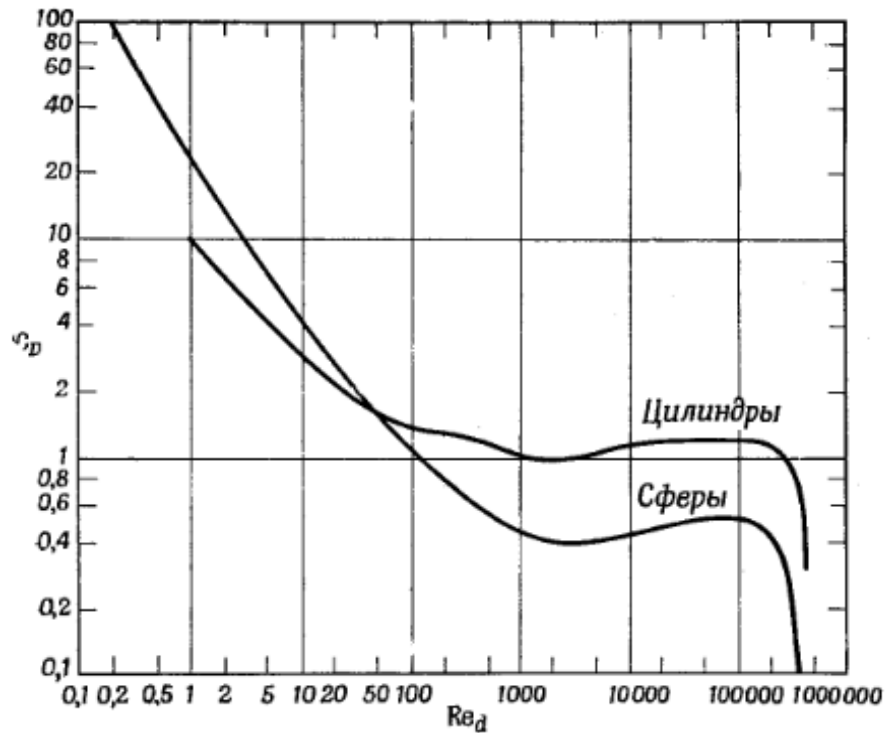


Рисунок 1.20. Стандартная кривая сопротивления для сферических и цилиндрических частиц

Представленная на рисунке 1.20 кривая была получена в результате обобщения большого числа опытных данных, ее погрешность для $Re_p < 500$ не превышает 3-4 %.

Наиболее удачной аппроксимацией для вычисления коэффициента сопротивления сферической частицы являются зависимости, полученные Хендерсоном [30]:

1. Для числа Маха, рассчитанному по скоростному скольжению фаз, меньше 1 ($M_p < 1$):

$$\begin{aligned}
 C_D(1) = & 24 / \left\{ Re_p + \sqrt{\gamma / 2} M_p \left[4,33 + 1,567 \exp \left(-0,247 \frac{Re_p}{\sqrt{\gamma / 2} M_p} \right) \right] \right\} + \\
 & + \left[\frac{4,5 + 0,38(0,03 Re_p + 0,48 \sqrt{Re_p})}{1 + 0,03 Re_p + 0,48 \sqrt{Re_p}} + 0,1 M_p^2 + 0,2 M_p^3 \right] \exp \left(\frac{-0,5 M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) + \\
 & + 0,6 \sqrt{\gamma / 2} M_p \left[1 - \exp \left(\frac{-0,5 M_p}{\sqrt{Re_p}} \right) \right], \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

где γ – показатель адиабаты.

2. Для числа Маха больше 1,75 ($M_p > 1,75$):

$$C_D(1,75) = 0,9 + \frac{0,34}{M_p^2} +$$

$$+ 1,86 \sqrt{\frac{M_p}{\text{Re}_p}} \left(2 + \frac{8}{\gamma M_p^2} + \frac{2,116}{\sqrt{\gamma/2} M_p} - \frac{4}{\gamma^2 M_p^4} \right) / \left(1 + 1,86 \sqrt{\frac{M_p}{\text{Re}_p}} \right). \quad (1.4)$$

3. Для промежуточного числа Маха ($1 \leq M_p \leq 1,75$) применяется зависимость, которая вычисляется как интерполяция между значениями $C_D(1)$ и $C_D(1,75)$:

$$C_D = C_D(1) + \frac{4}{3} (M_p - 1) [C_D(1,75) - C_D(1)]. \quad (1.5)$$

Выводы по главе 1

1. Проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении с целью сопоставления энергетических режимов и основных параметров применяемых гетерогенных потоков.

2. Проведен сравнительный анализ применяемых методов и средств моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой.

3. Рассмотрена газодинамика гетерогенных потоков, отмечена необходимость применения допущений в виде модели взаимопроникающих континуумов и отражены границы ее применимости.

4. Описаны основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока, которые заложены в коэффициенте сопротивления C_D . Проанализированы зависимости для вычисления коэффициента сопротивления C_D для частиц сферической формы.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ С ПРЕГРАДОЙ

При исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой на различных экспериментальных установках необходимо наличие измерительной системы для диагностики основных параметров гетерогенного потока и исследуемых моделей объекта.

Методов и средств измерений параметров великое множество. В данной работе остановимся на наиболее эффективных методиках для диагностики параметров, характерных при решении рассматриваемой задачи.

2.1. Лазерная доплеровская анемометрия

В настоящее время лазерные доплеровские анемометры (ЛДА) являются одним из самых эффективных, а зачастую и единственным средством для локальной диагностики гетерогенных потоков.

Лазерная доплеровская анемометрия является бесконтактным методом измерения. К основным преимуществам бесконтактных методов относится возможность диагностики без внесения возмущающих воздействий в исследуемую среду. К преимуществам непосредственно лазерной доплеровской анемометрии можно отнести:

- высокое пространственное разрешение из-за малой величины измерительного объема;
- возможность измерения мгновенных значений скоростей, причем всех трех компонент вектора скорости, как совместно, так и отдельно;
- линейная зависимость между частотой доплеровского сигнала и скоростью;
- высокая устойчивость и повторяемость полученных результатов.

При любых исследованиях для использования лазерных доплеровских анемометров должны выполняться следующие условия:

- исследуемая среда должна содержать светорассеивающие частицы и иметь небольшую оптическую плотность;
- экспериментальная установка должна иметь определенные места доступа для лазерных лучей или для ввода оптического зонда.

Принцип лазерной доплеровской анемометрии заключается в зависимости частоты излучения света, отражённого или рассеянного частицами, движущимися в потоке, от скорости их движения (эффект Доплера) [31, 32, 33, 34].

Пусть на частицу, движущуюся со скоростью V_p , падает монохроматическое излучение с частотой ω_0 и волновым вектором k_0 (рисунок 2.1). Тогда отражённое (рассеянное) излучение от поверхности частицы в пространство, согласно эффекту Доплера, будет иметь волновой вектор k_p и частоту ω_p , которая отличается от частоты падающего излучения.

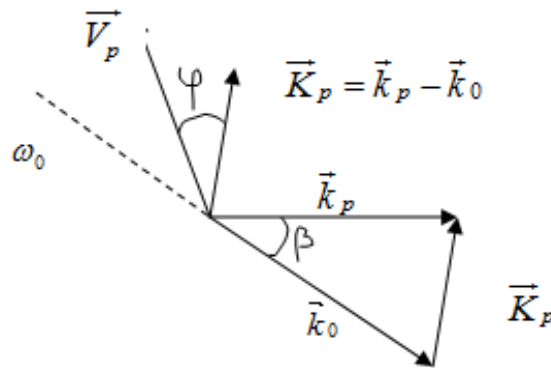


Рисунок 2.1. Взаимное расположение векторов рассеяния

Доплеровский сдвиг частоты можно найти из выражения:

$$\omega_p - \omega_0 = V_p \left(k_p - k_0 \right). \quad (2.1)$$

Данное выражение определяет проекцию вектора скорости частицы V_p на разностный вектор $k = k_p - k_0$, который, в свою очередь, зависит от длины волны падающего излучения λ_0 и угла β между векторами k_p и k_0 .

Скорость частицы выражается через доплеровскую частоту и вычисляется по формуле:

$$V_p \cdot \cos\varphi = f_D \cdot \frac{\lambda}{2\sin\beta}, \quad (2.2)$$

где $f_D = \frac{\omega_0}{2\pi}$, φ - угол между направлениями волны и движения частицы.

Характерной особенностью эффекта Доплера является линейная зависимость доплеровского сдвига частоты от величины скорости частицы. В свою очередь, коэффициент пропорциональности зависит от геометрических параметров схемы, а именно углов β и φ , и оптических свойств среды.

Для исследования гетерогенных потоков чаще всего используют дифференциальную схему лазерной доплеровской анемометрии. Принцип данной схемы заключается в том, что на частицу в гетерогенном потоке падают два лазерных пучка с волновыми векторами k_1 и k_2 и близкими частотами ω_1 и ω_2 (рисунок 2.2).

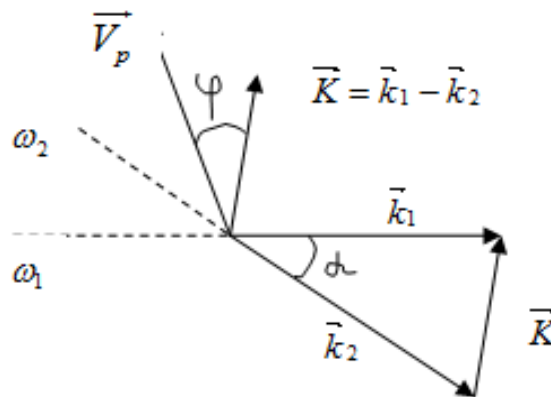


Рисунок 2.2. Взаимное расположение векторов рассеяния при дифференциальной схеме лазерной доплеровской анемометрии

Разностная частота между отраженными сигналами двух лазерных можно найти из выражения:

$$\omega_D = \omega_1 - \omega_2 = V_p \cdot (k_1 - k_2). \quad (2.3)$$

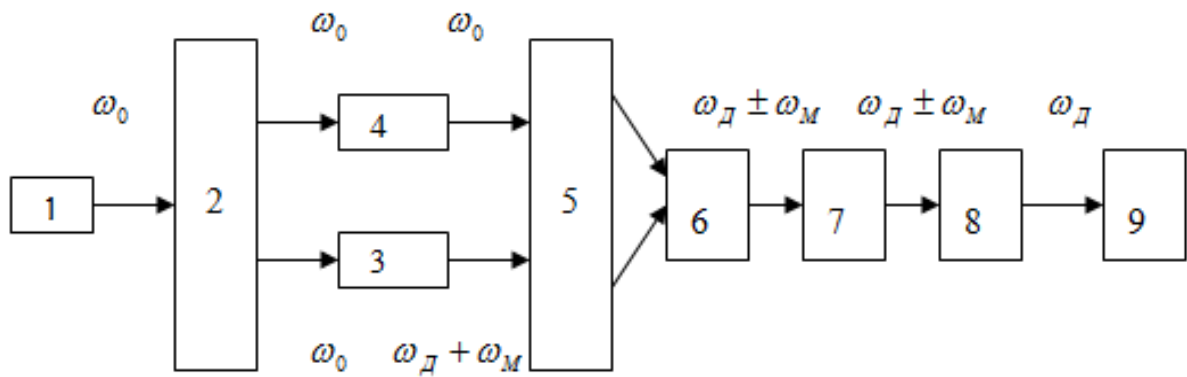
Скорость частицы можно вычислить, используя выражение (2.4):

$$f_D = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{2V_p}{\lambda_0 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.4)$$

где α - угол между двумя зондирующими лазерными пучками.

Необходимо отметить, что при дифференциальной схеме лазерной доплеровской анемометрии, разностная частота между отраженными сигналами ω_D (2.3) не зависит от направления наблюдения рассеянного излучения.

Общая схема лазерного доплеровского анемометра, работающего по дифференциальной схеме, представлена на рисунке 2.3.



- 1 – лазер, 2 – блок формирования зондирующих пучков (расщепитель),
 3 – однополосный модулятор, 4 – линия задержки, 5 – блок передающей оптики,
 6 – исследуемый объект (гетерогенный поток), 7 – блок приемной оптики,
 8 – фотоприемник, 9 – устройство обработки сигнала

Рисунок 2.3. Блок-схема ЛДА, работающего по дифференциальной схеме

Лазер – 1 является источником излучения ЛДА. В расщепителе – 2 исходное излучение лазера делится на два пучка. Для сдвига частоты излучения ω_0 на величину частоты модуляции – ω_m один из пучков проходит через однополосный модулятор – 3. Для выравнивания длины оптического пути другой пучок пропускается через линию задержки. Далее через блок передающей оптики – 5 пучки лазера направляются на исследуемый гетерогенный поток – 6. Рассеянное частицами гетерогенного потока лазерное излучение собирается приёмной оптикой – 7 и направляется в фотоприемник – 8 для суммирования рассеянного

излучения от обоих пучков. Результирующий сигнал, в котором и передается величина скорости частиц, с фотоприемника направляется в блок устройства обработки сигнала – 9.

Одним из основных параметров гетерогенных потоков, который необходимо регистрировать на экспериментальных установках, является скоростное скольжение фаз $|V - V_p|$. Величина погрешности ее измерения в результате диагностики скорости газа-носителя и скорости частиц независимо друг от друга может не удовлетворять необходимым параметрам достоверности исследования. Для регистрации скоростного скольжения фаз методами лазерной доплеровской анемометрии в гетерогенный поток, содержащий частицы определенного размера, необходимого для исследования, добавляются частицы такого размера, скорость которых будет максимально приближена к скорости газа-носителя. Естественно, чем меньше частица, тем ее скорость скольжения относительно газа-носителя будет меньше. Соответственно, методами лазерной доплеровской анемометрии замеряются две скорости: скорости обычных частиц, размеры которых соответствуют необходимым параметрам исследования, и скорости мелких частиц. Таким образом, при вычислении скорости скольжение фаз $|V - V_p|$, за скорость газа-носителя принимается скорость мелких частиц.

2.2. Определение плотности конвективного теплового потока

Для исследования баланса энергии частиц при взаимодействии гетерогенного потока с исследуемым объектом необходимо точными и надежными методами определять плотность конвективного теплового потока.

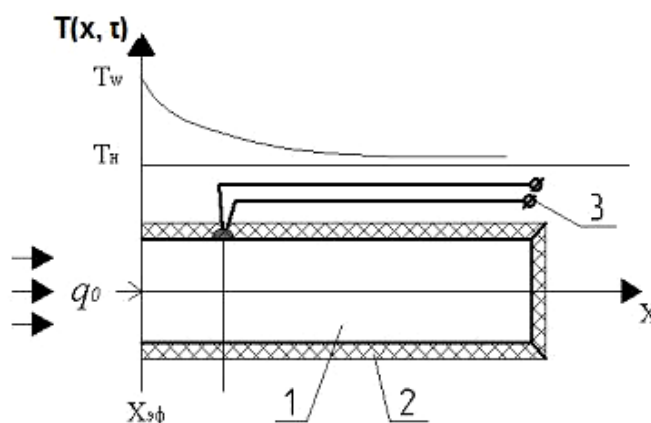
Применяемый метод решения калориметрических задач определяется исследуемым процессом и условиями проведения данного исследования. В основном данные приборы основываются на реализации в процессе теплообмена между набегающим потоком и исследуемым объектом регулярного режима 1-го рода [35].

Так как существует большое количество разнообразных приборов и калориметрических методов, рассмотрим наиболее надежные и часто применяемые калориметры для исследования взаимодействия гетерогенного потока с преградой – это калориметры "стержневого" и "таблеточного" типов. Они являются неохлаждаемыми калориметрами.

2.2.1. Калориметр «стержневого» типа

Калориметр «стержневого» типа (рисунок 2.4) состоит из:

1. Цилиндрического стержня бесконечной длины, который является теплоприемным элементом.
2. Теплоизоляции, которой покрываются все поверхности калориметрического датчика кроме одной торцевой поверхности.
3. Термопары, зачеканенной в калориметрический датчик для измерения изменения температуры теплоприемного элемента во времени.



- 1- цилиндрический стержень бесконечной длины (теплоприемный элемент),
2- теплоизоляция, 3- термопара

Рисунок 2.4. Схема калориметра «стержневого» типа

Так как калориметры стержневого типа основываются на реализации регулярного режима 1-го рода (коэффициент теплоотдачи и температура

набегающего потока постоянны), то плотность теплового потока в торцевую поверхность датчика можно вычислять, применяя закон Фурье:

$$q_0 = -\lambda \cdot \text{grad}T. \quad (2.5)$$

Процесс теплообмена между набегающим потоком и калориметрическим датчиком «стержневого типа» осуществляется только через одну торцевую поверхность, которая не теплоизолирована.

Теплоприемным элементом данного типа датчика является «бесконечный стержень», то есть тело классической формы, соответственно, решение задачи нестационарной теплопроводности упрощается до рассмотрения одномерного случая [35], поэтому:

$$\text{grad}T = \frac{dT(x, \tau)}{dx}, \quad (2.6)$$

где $dT(x, \tau)$ – функция распределения температуры по длине теплоприемного элемента во времени.

Решение основного дифференциального уравнения теплопроводности в одномерной постановке (2.7) позволит определить функцию распределения температуры по длине теплоприемного элемента во времени.

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.7)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала теплоприемного элемента, который определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c_p}. \quad (2.8)$$

Для решения основного дифференциального уравнения теплопроводности в одномерной постановке (2.7) задаются следующие условия однозначности:

1. Начальные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=0} = T_0. \quad (2.9)$$

2. Граничные условия:

$$T(x, \tau)|_{\tau=\tau_1} = T_w. \quad (2.10)$$

В результате решения поставленной задачи методом операционного исчисления [36], получаем:

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau_{\text{эксн}}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right). \quad (2.11)$$

Выразив из выражения (2.11) плотность теплового потока, получаем:

$$q_0 = \frac{\lambda [T(x, \tau) - T]}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)}, \quad (2.12)$$

где $\tau_{\text{эксн}}$ – время протекания эксперимента, то есть время взаимодействия торцевой поверхности калориметра «стержневого типа» с набегающим гетерогенным потоком; $\text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)$ – функция, получаемая в результате интегрирования функции ошибок Гаусса и определяемая выражением:

$$\text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left(-\frac{x^2}{4a\tau_{\text{эксн}}} \right) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}}, \quad (2.13)$$

где x – расстояние по длине теплоприемного элемента от торцевой части, взаимодействующей с набегающим потоком, до точки зачеканивания термопары.

Графический вид функции (2.13) представлен на рисунке 2.5 [37].

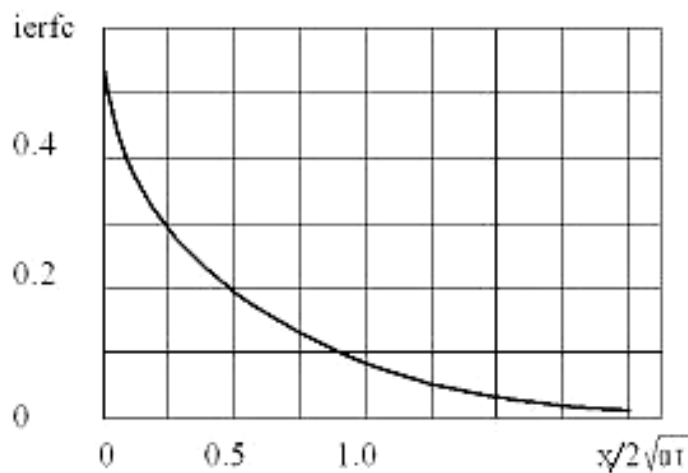


Рисунок 2.5. Графический вид функции $\text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau_{\text{эксн}}}} \right)$

Выражение (2.12) позволяет определить конвективный тепловой поток от набегающего гетерогенного потока в калориметрический датчик «стержневого типа».

На рисунке 2.6 представлена фотография калориметра «стержневого» типа.

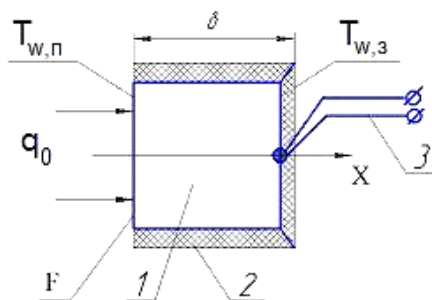


Рисунок 2.6. Калориметр «стержневого» типа

2.2.2. Калориметр «таблеточного» типа

Калориметр «таблеточного» типа (рисунок 2.7) состоит из:

1. Теплоприемного элемента в виде таблетки толщиной δ ;
2. Теплоизоляции, которой покрываются все поверхности калориметрического датчика кроме одной торцевой поверхности площадью F ;
3. Термопары, зачеканенной в калориметрический датчик для измерения изменения температуры теплоприемного элемента во времени.



1 - теплоприемный элемент, 2 - теплоизоляция, 3 - термопара, q_0 - плотность теплового потока, $T_{w,n}$ и $T_{w,z}$ - температура передней и задней поверхностей, соответственно, F - площадь торцевой поверхности, воспринимающей теплоту

Рисунок 2.7. Схема калориметра «таблеточного» типа

Основной принцип работы калориметрического датчика «таблеточного» типа заключается в том, что все подведенная набегающим гетерогенным потоком теплота к теплоприемному элементу с известными характеристиками (массой, геометрическими параметрами) расходуется на изменении его энтальпии [36]. Данный принцип можно представить с помощью следующего выражения:

$$Q = \Delta I = \bar{c} \cdot m \frac{d\bar{T}(x, \tau)}{d\tau} \Delta\tau, \quad (2.14)$$

где m - масса теплоприемного элемента, \bar{c} - удельная теплоемкость материала теплоприемного элемента при среднемассовой температуре \bar{T} , $\Delta\tau$ - время протекания эксперимента, то есть время взаимодействия торцевой поверхности калориметра с набегающим гетерогенным потоком.

Если в качестве геометрической формы теплоприемного элемента выбрать «таблетку» с площадью торцевой поверхности F , толщиной δ и плотностью материала ρ , то масса данного теплоприемного элемента определяется из выражения:

$$m = F \delta \rho. \quad (2.15)$$

Тогда выражение (2.14) для калориметра «таблеточного» типа принимает вид:

$$q = \frac{Q}{F \cdot \Delta\tau} = \rho c \delta \frac{(\bar{T}_{таб,2} - \bar{T}_{таб,1})}{\Delta\tau}, \quad (2.16)$$

где $(\bar{T}_{таб,2} - \bar{T}_{таб,1})$ – изменение температуры теплоприемного элемента в интервале времени проведения эксперимента $\Delta\tau$, то есть $\bar{T}_{таб,2}$ – среднемассовая температура теплоприемного элемента в момент времени τ_2 , $\bar{T}_{таб,1}$ – среднемассовая температура теплоприемного элемента в момент времени τ_1 .

В свою очередь, среднемассовые температуры определяются выражением:

$$\bar{T}_i(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T_i(x, \tau) dx. \quad (2.17)$$

На рисунке 2.8 представлена фотография калориметра «таблеточного» типа.



Рисунок 2.8. Калориметр «таблеточного типа»

Величина относительной суммарной квадратичной погрешности определения тепловых потоков рассчитывается по формуле [1]:

$$\frac{\Delta q}{q_0} = \pm \left[\Delta \left(\frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)^2 + \Delta \left(\frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)^2 + \Delta \left(\frac{\Delta q_{0,\text{пот.}}}{q_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.18)$$

где q_0 определяемая плотность теплового потока в приемный элемент калориметра, $\Delta \left(\frac{\Delta q_{0,\text{пот.}}}{q_0} \right)$ – неучтенные потери тепла в калориметре, $\Delta \left(\frac{\Delta \bar{T}_{\tau,k}}{T_{\tau,k}} \right)$ – погрешность, обусловленная термической (температурной) инерцией термопары теплоприемного элемента калориметра, $\Delta \left(\frac{d\bar{T}_k}{d\tau} \right)$ – погрешность обработки результатов измерений.

2.3. Определение температуры поверхности исследуемого объекта

При исследовании взаимодействия гетерогенного потока с преградой определение температуры поверхности преграды является важной задачей. Данный параметр можно измерять как контактными методами, так и бесконтактными.

К контактными методам диагностики температуры поверхности исследуемого объекта относятся измерения с помощью термопар. К основным преимуществам применения термопар относятся [38, 39, 40]:

- простота применения;
- высокая точность;
- достаточная чувствительность к изменению температуры.

В таблице 2.1 представлены наиболее популярные виды термопар и их основные характеристики [41].

Таблица 2.1. Термопары и их характеристики

Тип термопары	Термо-ЭДС, mV при $t = 100\text{ }^{\circ}C$	Верхний предел измерения, $^{\circ}C$		Максимально допустимая термо ЭДС, mV
		длительно	кратковременно	
Медь-копель	4,75	200...350	500	-
Медь-константан	4,1	350	400	27,4
Хромель-копель	6,35	600	800	49,11...66
Хромель-алюмель	4,1	1100	1300	45,16
Платина-платинородий	0,64...0,08	1480	1600	15...16
Платинородий-платинородий	0,456	1600	1800	11...13
Вольфрам - вольфрамрений	1,34	1800	2200	26,8...27,37

Основным недостатком термопар является наличие верхнего предела измеряемой температуры. Соответственно, при температурах набегающего потока превышающих данную величину используют бесконтактные, а точнее оптические методы измерения температуры поверхности преграды [39, 42].

Оптические методы измерения температуры поверхности исследуемого объекта основаны на применении закона Планка [43].

Для определения истинной температуры T_w необходимо знать величину яркостной температуры $T_{w,\lambda}$:

$$T_w^{-1} = T_{w,\lambda}^{-1} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_{\lambda}, \quad (2.19)$$

где ε_λ – монохроматическая степень черноты, c_2 – постоянная излучения, λ – длина волны.

А согласно закону Планка для определения яркостной температуры $T_{w,\lambda}$ исследуемого объекта необходимо знать его энергетическую яркость излучения B_λ на определенной длине волны λ :

$$B_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot B_{0,\lambda} = \varepsilon_\lambda \cdot c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}}\right), \quad (2.20)$$

где B_λ и $B_{0,\lambda}$ – монохроматические яркости излучения исследуемого объекта и абсолютно черного тела, соответственно; c_1 – постоянная излучения.

Формула (2.20) также имеет ограничения по применению, она справедлива при: $\frac{c_2}{\lambda \cdot T_{w,\lambda}} \gg 1$, то есть при максимальной температуре поверхности исследуемого объекта $T_w < 3000$ К и длине волны $\lambda < 1$ мкм.

Основной проблемой данного типа оптических методов является определение истинной температуры измерения T_w . Наиболее популярный способ диагностики истинной температуры с помощью сверления глубокой выемки в исследуемых объектах не возможен в применении для исследования задач взаимодействия гетерогенного потока с преградой, так как для данного типа задач свойственны большие градиенты температур в поверхностных слоях исследуемых объектов. Поэтому для определения истинной температуры поверхности преграды при взаимодействии с гетерогенным потоком применяют методы, которые используют сторонний источник света [44]. К таким методам относятся:

1. Метод обращения для самоизлучающей поверхности;
2. Рефлекторный метод.

Оценка среднеквадратичной погрешности измерения температуры поверхности осуществляется с помощью выражения [1]:

$$\bar{\sigma}(\Delta T_w) = \pm \left(\Delta T_{\text{гр}}^2 + \Delta T_\lambda^2 + \Delta T_\varepsilon^2 + \Delta T_A^2 \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

где $\Delta T_{\text{гр}}$ – погрешность градуировки системы измерения, ΔT_{λ} – погрешность определения длины волны монохроматора (пирометра), ΔT_{ε} – погрешность определения степени черноты поверхности, – ΔT_{Λ} погрешность пирометрического ослабления яркости излучения нейтральным фильтром.

Выводы по главе 2

1. Проведен критический анализ методов и средств диагностики основных параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой.
2. Проведен критический анализ лазерной доплеровской анемометрии, как основного метода для измерения локальных скоростей, как газа-носителя, так и частиц.
3. Проведен критический анализ калориметрических методов измерения конвективного теплового потока от гетерогенной среды в исследуемый объект. Рассмотрены калориметры «стержневого» и «таблеточного» типа.
4. Проведен критический анализ методов и средств диагностики температуры поверхности исследуемого объекта. Рассмотрены контактные и бесконтактные методы.

3. ОБТЕКАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ, ПРИТУПЛЕННОГО СФЕРОЙ, ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИМ ГЕТЕРОГЕННЫМ ПОТОКОМ

Исследование проблемы обтекания тел произвольной формы с набегающим потоком актуально во многих областях науки и техники. Однако даже при упрощённой постановке (набегающий поток – идеальный газ), задачи подобного плана не имеют аналитического решения для тел произвольной формы.

Если же анализируется задача обтекания тела потоком вязкой жидкости, решение задачи значительно усложняется. Это объясняется тем, что в уравнениях математической модели появляются, так называемые, «вязкие члены», которые вносят значительные изменения в характеристики набегающего потока, например, в законы распределения давления и скорости и др. [45]

Задача ещё более усложняется, если обтекание тела реализуется высокоскоростным полидисперсным гетерогенным потоком. Как отмечалось, с задачами подобного рода приходится сталкиваться при полёте высокоскоростных изделий авиационной и ракетной техники в аномальных зонах атмосферы с естественными (дождевыми) и искусственными (пылевыми) образованиями [46].

В данной главе сделана попытка с использованием математического моделирования решения численным методом задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

3.1. Математическая модель обтекания летательного аппарата конической формы, притупленного сферой, высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком

Гетерогенные потоки встречаются как в природе, так и в практической деятельности. С точки зрения теоретических знаний, на сегодняшний день

накоплен значительный опыт для математического моделирования течения гетерогенных потоков. Тем не менее, задача обтекания тел разных форм высокоскоростными гетерогенными потоками все ещё остается актуальной при эксплуатации в экстремальных условиях изделий авиационной, ракетной и космической техники. Задача также требует своего решения в ряде других отраслей промышленности.

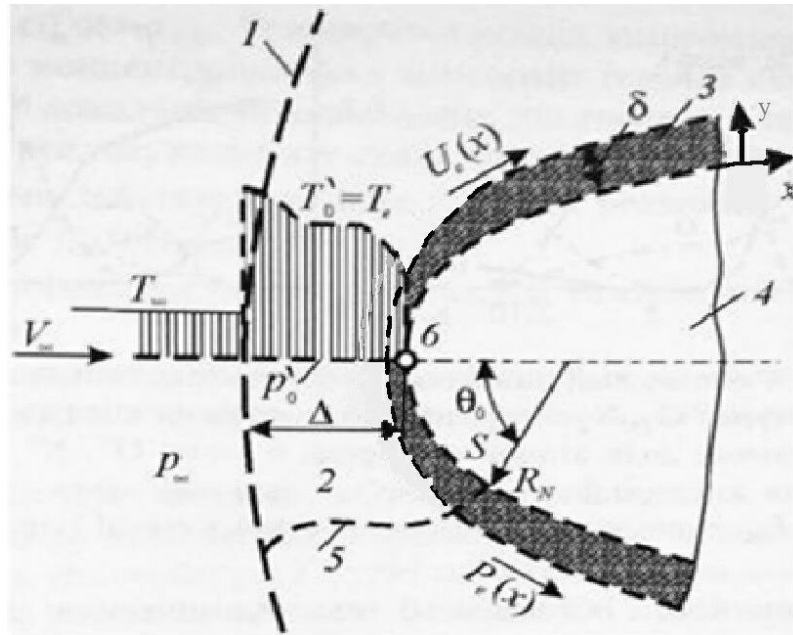
3.1.1. Постановка задачи

Решению подлежала задача обтекания летательного аппарата сверхзвуковым гетерогенным потоком. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 3.1 [12].

Таблица 3.1. Исходные данные

Параметр.	Характеристика.
Форма летательного аппарата	Конус, притупленный сферой
Геометрические размеры летательного аппарата	– радиус сферического притупления: $R_N=0,5$ м – длина конической части по образующей: $L_{кон.}=2$ м – угол конусности: $\gamma =30^\circ$
Угол атаки при полёте	$\alpha = 0^\circ$
Материал частиц «К-фазы»	SiO_2
Дисперсность твердой фазы	от 1 до 30 мкм
Массовая концентрация твердой фазы в гетерогенном потоке	до 10 %
Высота полета	$H=20$ км
Скорость полета (число Маха)	$M_\infty \leq 6$

Разработанная математическая модель задачи в такой постановке, построена на описании комплекса процессов, происходящих за ударной волной – в сжатом и пограничном слое, а также на поверхности летательного аппарата (рисунок 3.1) [11].



1 – ударная волна, 2 – зона невязкого течения за ударной волной, 3 – пограничный слой, 4 – затупленное тело, 5 – линия перехода через скорость звука ($M=1$), 6 – передняя критическая (ПКТ), Δ – толщина сжатого слоя, δ – толщина пограничного слоя, $T'_0 = T_e$ – изменение температуры в сжатом слое по нормали в ПКТ, θ – угловая координата, T_∞ и V_∞ – температура и скорость невозмущенного потока, $U_e(x)$ – распределение скорости потока на внешней границе пограничного слоя, $P_e(x)$ – распределение давления на внешней границе пограничного слоя

Рисунок 3.1. Схема обтекания притупленного сферой конуса сверхзвуковым потоком

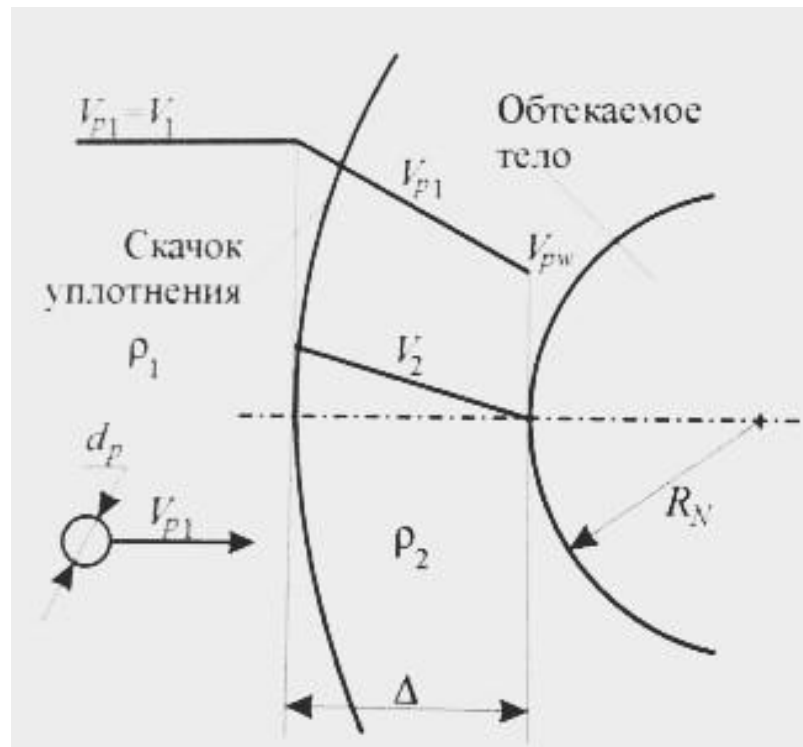
Обтекание затупленных тел сверхзвуковыми потоками характеризуется следующим набором газодинамических и физико-химических процессов [47]:

- во-первых, при сверхзвуковых скоростях обтекания перед затупленным телом образуется отошедшая ударная волна, которая отходит от поверхности обтекаемого тела и остается эквидистантной от неё в окрестности передней критической точки;

- во-вторых, необходимо отметить автомодельность давления вдоль поверхности тела при больших значениях M_∞ ;

- в-третьих, за отошедшей ударной волной происходит рост температуры, который обусловлен торможением набегающего потока, то есть происходит переход кинетической энергии потока в тепловую.

Так как течение между ударной волной и поверхностью обтекаемого тела дозвуковое, то при обтекании тела высокоскоростным гетерогенным потоком, скорость частиц также будет снижаться вслед за изменением скорости газ-носителя (рисунок 3.2). Но по мере движения гетерогенного потока вдоль поверхности тела происходит разгон до первоначальных значений числа Маха невозмущенного потока. При этом мы имеем дело с высокотемпературным гетерогенным потоком.



$V_{p\infty}$ – скорость «К-фазы» в невозмущенном потоке, V_{∞} и ρ_1 – скорость и плотность газовой фазы в невозмущенном потоке, V_{p2} – скорость «К-фазы» за ударной волной, V_2 и ρ_2 – скорость и плотность газовой фазы за ударной волной.

Рисунок 3.2. Схема торможения газовой фазы и «К-фазы» в сжатом слое

3.1.2. Математическая модель течения газовой фазы

Газовая динамика – это раздел механики сплошных сред, описывающий движение жидкостей и газов в рамках модели сплошной среды.

Сплошность среды означает, что масштаб рассматриваемых явлений, значительно больше длины свободного пробега молекул, а также позволяет нам применять все физические законы и свойства как к макрообъектам, так и к бесконечно малым объёмам.

Как известно, произвольные движения сплошной среды описываются уравнениями Навье-Стокса. Следует отметить, что в связи с невозможностью точного разрешения общей системы уравнений Навье-Стокса, перед исследователями стоит проблема отыскания инструмента приближенного решения задач газовой динамики, но при самой общей постановке. Как правило, в качестве подобного инструмента используются разработанные численные методы решения, в которых применён достаточно гибкий и прозрачный математический аппарат. Но для данного типа задач возникает проблема получения сходящегося и устойчивого численного решения.

В отдельных случаях при решении задач подобного рода используется метод приближенных вычислений с заранее оговоренными свойствами и границами применимости.

В настоящее время разработка эффективных численных методов стало самостоятельным научным направлением, одним из основных достижений которого являются специализированные вычислительные пакеты. Данные пакеты программ создаются для решения конкретного класса задач и на сегодняшний день являются наиболее эффективным и доступным инструментом.

В данной работе для построения математической модели учитывались «возможности» и функционал CFD (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) комплекса ANSYS CFX. Он относится к наиболее популярным и широко используемым специализированным вычислительным пакетам, предназначенных для решения задач газодинамики. Данный программный пакет интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench, что позволяет решить поставленную задачу полностью, не прибегая к помощи других инструментов. Также к преимуществам данного пакета относится наличие информации о практике его применения [11].

В общем случае для решения многопараметрической задачи газовой динамики создаётся математическая модель течения, которая решается численными методами. Такая модель включает систему из четырех независимых уравнений в виде [11]:

1. Систему уравнений Навье-Стокса в векторной форме:

- уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \Delta \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (3.1)$$

- уравнения количества движения (сохранения импульса)

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot \vec{\tau} + S_M, \quad (3.2)$$

где $\vec{\tau}$ - тензор напряжений:

$$\vec{\tau} = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \partial \nabla \cdot \vec{V} \right]. \quad (3.3)$$

В свою очередь, δ - дельта-функция Кронекера

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

2. Уравнение энергии (сохранения энергии):

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial \tau} - \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_0) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \vec{\tau}) + \vec{V} S_E + S_M, \quad (3.5)$$

где h_0 - энтальпия торможения газовой фазы:

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}, \quad (3.6)$$

h - статическая (термодинамическая) энтальпия:

$$h = C_p(p, T) dT. \quad (3.7)$$

3. Уравнение состояния для каждого i -го компонента газовой фазы

$$p_i = \frac{\rho_i}{M_i} R_i T. \quad (3.8)$$

В соотношениях (3.1)÷(3.8) использованы следующие обозначения: p - статическое давление газовой фазы, ρ - плотность газовой фазы, V - скорость газовой фазы, T - статическая температура газовой фазы, τ - время, S_M - источниковый член для импульса, S_E - источниковый член для энергии, μ - коэффициент динамической вязкости газовой фазы, λ - коэффициент теплопроводности газовой фазы, ∇ - оператор Гамильтона (набла), знак (\rightarrow) - обозначает векторную величину.

Анализ представленных дифференциальных уравнений (3.1)÷(3.8) показывает, что основные переменные (плотность ρ , давление p и температура T) подчиняются обобщенному закону сохранения [48, 49, 50].

Пусть зависимая переменная, которая представляет основные переменные (ρ, p, T) , обозначается - ϕ .

В таком случае, обобщенное дифференциальное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \nabla(\rho\vec{V}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S, \quad (3.9)$$

где Γ - коэффициент диффузии; S - источниковый член.

Данное обобщенное дифференциальное уравнение состоит из четырех членов: нестационарного, конвективного, диффузионного и источникового. При записи данного уравнения для одной из основных переменных коэффициенту диффузии Γ и источниковому члену S придаётся смысл, соответствующий данной переменной.

Система уравнений (3.1)÷(3.8) представляют общую математическую модель поведения жидкости (газа), которая детально и строго описывает практически весь спектр режимов её течений. Однако на практике при реализации высокоскоростных течений, например, гиперзвуковых, математическая модель усложняется. В этом случае представленная выше система дополняется рядом

уравнений (совокупность эмпирических, алгебраических или дифференциальных уравнений), которые представляют модели турбулентности, отрывные течения, неравновесную химическую кинетику, неизотермические полидисперсные гетерогенные течения и др.

Наиболее востребованным численным методом решения математических моделей газовой динамики является метод контрольного объема, который реализован в CFD комплексе ANSYS CFX [12].

3.1.3. Математическая модель течения «К-фазы»

На сегодняшний день, при математическом моделировании обтекании тел гетерогенными потоками используют в основном два метода [51]:

- метода Эйлера (метод Эйлер-Эйлер), описывающий как течение несущей газовой, так и дисперсной фаз. В методе гетерогенная система в целом рассматривается как сплошная среда, к которой применяется модель взаимопроникающих континуумов. Основным недостатком метода является сложность адекватного описания процесса отражения частиц от поверхности обтекаемого тела, а также взаимодействие отраженных от поверхности тела частиц с частицами набегающего гетерогенного потока [52];

- метод Эйлер-Лагранж: течение несущей фазы описывается методом Эйлера, а динамика дисперсной фазы методом Лагранжа. Данный подход с достаточной точностью описывает столкновения как между частицами, так и частиц с поверхностью [53].

В настоящей работе для решения задачи использован метод Эйлер-Лагранж. В результате для «К-фазы» по методу Лагранжа рассчитывались траектории и характеристики индивидуальных частиц разной дисперсности в определенные промежутки времени. Например, ускорение частицы гетерогенного потока вычислялось с использованием уравнения переноса количества движения в виде [11]:

$$m_p \frac{dU_p}{d\tau} = F_D, \quad (3.10)$$

где m_p – масса частицы, U_p – скорость частицы, F_D – сила аэродинамического сопротивления межфазного взаимодействия, возникающая из-за разности скоростей газовой и твердой фаз. В свою очередь, F_D представляется формулой:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_F A_p |U_F - U_p| (U_F - U_p), \quad (3.11)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, ρ_F – плотность газовой фазы, A_p – площадь миделевого сечения частицы, U_F – скорость газовой фазы.

В случае химически неактивных сжатого и пограничного слоя конвективный теплообмен между газом-носителем и частицей твердой фазы рассчитывается с использованием соотношения [54]:

$$Q_{кон,p} = \pi \cdot d_p \cdot \lambda_{газ} \cdot Nu_{w,d} (T_{газ} - T_p), \quad (3.12)$$

где $\lambda_{w,газ}$ – коэффициент теплопроводности газа при температуре поверхности частицы, $T_{газ}$ – температура газа-носителя, $T_{w,p}$ – температура поверхности частицы, $Nu_{w,d}$ – число Нуссельта. Индексы «w» и «p» означают, что для критерия $Nu_{w,d}$ определяющей температурой является температура частицы $T_{w,p}$, а характерным размером – диаметр частицы.

Из теории конвективного теплообмена известно, что при обтекании сферы ламинарным потоком газа, число Нуссельта можно определить из критериального алгебраического соотношения вида [54]:

$$Nu_{w,d} = 2 + 0.6 Re_{w,d}^{0.5} \cdot Pr_w^{1/3} \quad (3.13)$$

где $Pr_w = \frac{\mu_{газ} \cdot Cp_{газ}}{\lambda_{газ}}$. В свою очередь, $Cp_{газ}$ – удельная теплоёмкость газовой фазы при температуре стенки; $\lambda_{газ}$ – коэффициент теплопроводности газовой фазы при

температуре стенки; $\mu_{\text{газ}}$ – коэффициент динамической вязкости газовой фазы при температуре стенки.

Далее, зная $Q_{\text{кон},p}$, просто определить конечную температуру частицы, достигнувшей поверхности конструкции. С этой целью используется соотношение:

$$Q_{\text{кон},p} = c_p \cdot m_p \cdot (T_{p,\text{кон}} - T_{\text{нач}}) \quad (3.14)$$

3.2. Особенности численного решения математической модели процесса обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой

Система уравнений (3.1÷3.8) и обобщенное уравнение сохранения (3.9) представляет математическую модель течения газовой фазы. Она состоит в основном из дифференциальных уравнений в частных производных первого и второго порядка, в которых, в свою очередь, присутствует нелинейная зависимость членов уравнений от переменных.

Так как на практике точное аналитическое решение данной системы можно получить только для простых тел: пластины, сферы, цилиндра и клина – то для решения задачи газовой динамики в общей постановке применяются численные методы.

3.2.1. Структура численного решения основных дифференциальных уравнений газовой динамики

Схема последовательности проведения операций при численном решении математической модели представлена на рисунке 3.3 [11].



Рисунок 3.3. Последовательность операций при численном решении математической модели

Для решения поставленной задачи исходную систему дифференциальных уравнений в частных производных, которая полностью описывает исследуемый нами процесс, а также условия однозначности (начальные и граничные условия) необходимо преобразовать в систему дискретных алгебраических уравнений. Данное преобразование называется дискретизацией. Выбор метода дискретизации зависит от стационарности процесса, то есть, содержат ли исходные дифференциальные уравнения производные по времени.

При исследовании нестационарного процесса дискретизация производных по времени осуществляется в основном с помощью разностных методов [49, 50]. Для дискретизации пространственных производных применяют метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных объемов [55, 56].

Полученные в результате дискретизации алгебраические уравнения связывают между собой значения искомым переменных в узлах сетки, которая

охватывает всю расчётную область и распределена в ней как во времени, так и в пространстве [48].

На этапе дискретизации происходит разложение исходной функции в ряды. Данные ряды упрощаются путём отбрасывания членов высшего порядка малости и заменой дифференциалов переменных их приращениями. В результате данного преобразования возникает ошибка аппроксимации.

Известно, что для согласованности исходных дифференциальных уравнений в частных производных и системы алгебраических уравнений, полученных в результате дискретизации, в каждом узле сетки, необходимо, чтобы размеры ячеек сетки и величина шага по времени стремились к нулю. Соответственно, величина ошибки аппроксимации характеризует свойство согласованности численного метода дискретизации [55, 56].

Решение алгебраических уравнений, аппроксимирующих заданное дифференциальное уравнение в частных производных, называют сходящимся, если это решение приближается к точному решению дифференциального уравнения для любого значения независимой переменной, по мере того как размеры ячеек сетки и шаг по времени приближаются к нулю. В этом случае может быть установлена ошибка решения, которая определяется как разница между точными решениями дифференциальных уравнений и решением алгебраических уравнений и характеризует свойство сходимости [55, 56].

На сегодняшний день наиболее популярным методом дискретизации при решении задач газовой динамики является метод контрольного объема. Данный метод реализован в CFD комплексе ANSYS CFX.

3.2.2. Метод контрольного объёма

Метод конечных объёмов (МКО) или метод контрольного объёма в англоязычной литературе называется Finite Volumes Method (FVM).

Основа метода выражается в следующем: расчётная область с помощью сетки разбивается на совокупность непересекающихся контрольных объёмов, для которых должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии. Дифференциальные уравнения интегрируют по каждому контрольному объёму с использованием функции формы. Данная функция характеризует изменение искомой переменной ϕ между расчётными узловыми точками сетки. В результате определяется дискретный аналог исходного дифференциального уравнения. Расчётным узлом в МКО является центр контрольного объёма [11].

Полученный подобным образом дискретный аналог выражает закон сохранения искомой переменной ϕ для конечного контрольного объёма точно так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого контрольного объёма [48].

Детальное представление МКО проведём на примере преобразований уравнений неразрывности, количества движения и обобщенного дифференциального уравнение в координатной форме. Имеем [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i) = 0, \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i V_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \right], \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \right] + S. \quad (3.17)$$

Далее, необходимо проинтегрировать каждое из представленных выражений по контрольному объёму Ω . Для этого воспользуемся теоремой Остроградского-Гаусса и выполним преобразование объёмных интегралов в поверхностные, где это необходимо. Также следует отметить, что при отсутствии деформации контрольного объёма расчётная сетка не меняется с течением времени и соответствующие производные могут быть вынесены за знак интеграла [11]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho V_i dn_i = 0, \quad (3.18)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho V_j d\Omega + \int_S \rho V_i V_j dn_i = - \int_S P dn_i + \int_S \mu \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) dn_i + \int_{\Omega} S V_j d\Omega, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega + \int_S \rho V_i \phi dn_i = \int_S \Gamma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) dn_i + \int_{\Omega} S d\Omega, \quad (3.20)$$

где Ω - контрольный объём; S - контрольная поверхность, ограничивающая контрольный объём; dn_i - дифференциал декартовой составляющей вектора внешней нормали к поверхности.

В приведенных выражениях количественный уровень переменных в контрольном объёме определяется объёмными интегралами, а потоки переменных через границы контрольного объёма – поверхностными интегралами.

Далее с помощью схем дискретизации различного порядка точности, преобразуем точные интегральные уравнения (3.18 – 3.20) в дискретную форму.

Объёмные составляющие преобразуем путём аппроксимации переменных внутри отдельных сегментов ячейки (рисунок 3.4) и их последующего интегрирования по каждому из объёмных сегментов, представляющих в сумме контрольный объём. Поверхностные составляющие (потоки) сначала вычисляются для точек интегрирования, расположенных в центре сегмента поверхности, в которую заключен контрольный объём, а затем полное изменение вычисляется интегрированием полученных потоков через отдельные грани [49, 50].

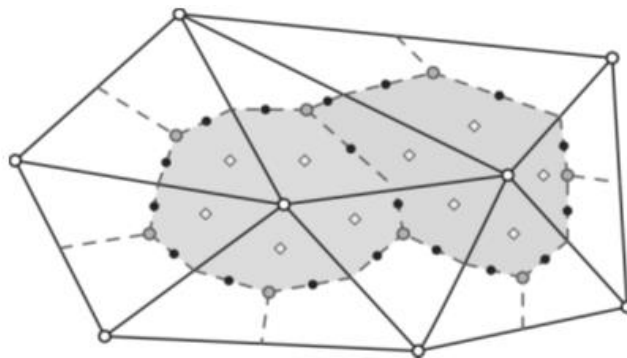


Рисунок 3.4. Формирование контрольных объёмов на основе сеточной модели

Используя далее схему аппроксимации Эйлера с разностью назад первого порядка, дискретная форма интегральных соотношений преобразуется к виду [11]:

$$\Omega \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho V_i \Delta n_i)_{ip} = 0, \quad (3.21)$$

$$\Omega \left(\frac{\rho V_j - \rho^0 V_j^i}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (V_j)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \Delta n_i \right) + \overline{S}_{V_j} \Omega, \quad (3.22)$$

$$\Omega \left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) \Delta n_i \right) + \overline{S} \Omega, \quad (3.23)$$

где Δt - шаг по времени; Δn_i - приращение декартовой составляющей вектора внешней нормали к поверхности; индекс « ip » означает вычисление для точки интегрирования и суммирование по всем точкам интегрирования данного контрольного объёма; индекс «0» указывает, что величина соответствует предыдущему значению времени.

Запишем далее выражение для массового расхода газа \dot{m}_{ip} через поверхность контрольного объёма в виде [11]:

$$\dot{m}_{ip} = (\rho V_i \Delta n_i)_{ip}. \quad (3.24)$$

Величины искоемых переменных, определённые в результате решения, приводятся к центрам соответствующих контрольных объёмов. Для определения значений некоторых членов уравнений в точках интегрирования используются функции формы [11].

Характер изменения искомой переменной ϕ внутри контрольного объёма определяется зависимостью [11]:

$$\phi = \sum_{i=1}^n N_i \phi_i, \quad (3.25)$$

где N_i - аппроксимирующая функция для i -го узла; ϕ_i - значение переменной в i -м узле; n - число узлов элемента.

Суммирование проведём по всем узлам контрольного объёма, используя при этом следующие свойства аппроксимирующей функции [11]:

$$\text{- для } i\text{-го узла: } \sum_{i=1}^n N_i = 1; \quad (3.25)$$

$$\text{- для } j\text{-го узла: } N_i = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (3.26)$$

Одним из основных преимуществ МКО перед другими методами дискретизации является выполнение законы сохранения массы, количества движения и энергии в любом контрольном объёме, в любой группе контрольных объёмов, и, следовательно, во всей расчётной области. На данное свойство не оказывает влияние размер сетки [11].

3.3. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой

Программный комплекс ANSYS CFX ориентирован на решение численными методами любых задач газовой динамики. Одним из преимуществ данного комплекса является его интеграция в расчётную среду ANSYS Workbench, что позволяет решать задачи, используя только данный инструмент.

В CFD комплекс ANSYS CFX состоит из следующих модулей:

- препроцессор CFX-Pre;
- решатель CFX-Solver;
- постпроцессор CFX-Post.

3.3.1. Построение расчётной модели

На начальном этапе численного моделирования необходимо разработать расчётную модель, которая включает следующие элементы:

- геометрическая модель;
- сеточная модель;
- параметры, определяющие свойства домена: модель газа, модель турбулентности и граничные условия.

Все перечисленные элементы расчётной модели взаимосвязаны. Структура построения расчётной модели представлена на рисунке 3.5.

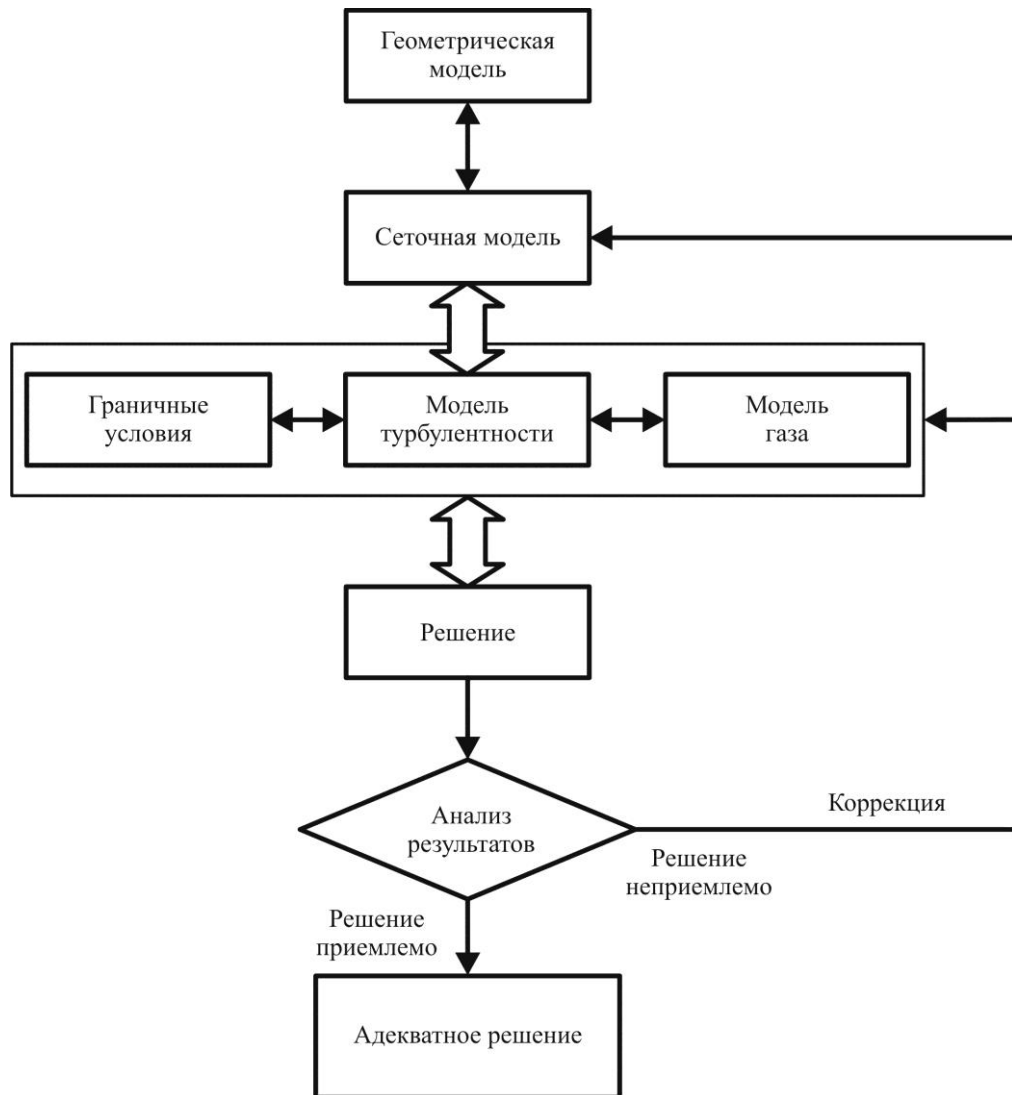


Рисунок 3.5. Структура построения расчётной модели

Основой всей расчётной модели является геометрическая модель. В настоящее время разработано множество инструментов в виде систем автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют проектировать геометрические модели любой сложности.

Геометрическая модель (рисунок 3.6) для поставленной задачи представляет из себя расчётную область с вырезанным из неё летательным аппаратом. Форма ЛА – конус, притупленный сферой. Геометрические параметры ЛА: диаметр сферы притупления, $d_{сферы} = 0.5 \text{ м}$; длина конической части по образующей, $l_{кон.} = 2 \text{ м}$; угол конусности, $\alpha = 30^\circ$.

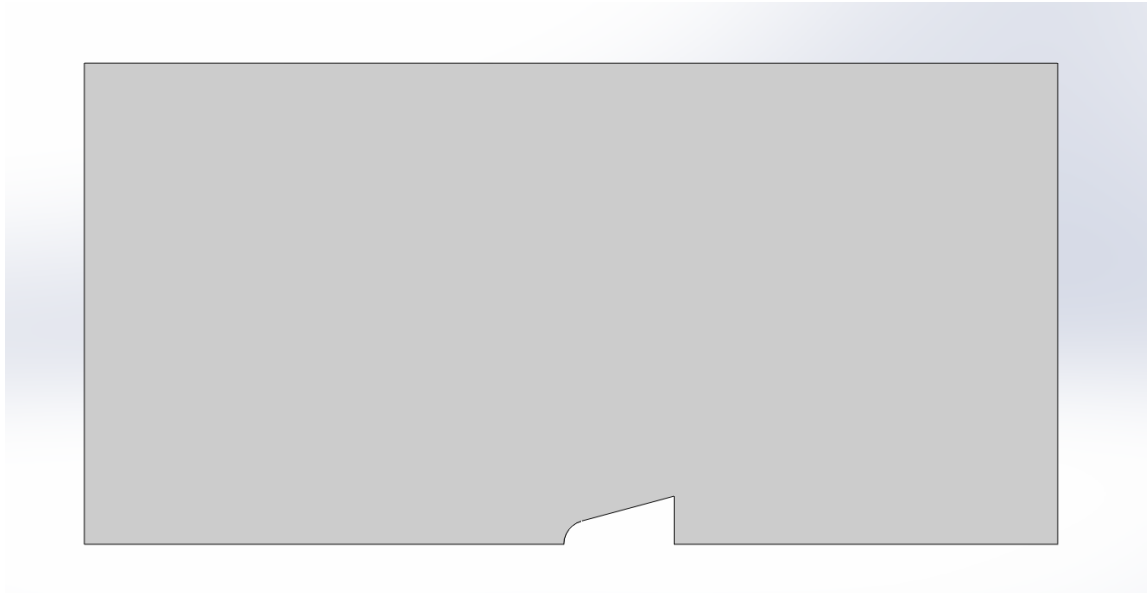


Рисунок 3.6. Геометрическая модель

На основе геометрической модели проектируется сеточная модель. Данный этап выполнялся в программном пакете ANSYS ICEM CFD, который имеет блочную структуру [12]. Разделение на блоки произведено по функциональному назначению. ANSYS ICEM CFD состоит из следующих блоков (модулей) [54]:

- геометрический модуль. Предназначен для построения несложных геометрических моделей, а также для необходимой корректировки импортированных геометрических моделей;

- модуль Shell Meshing. Предназначен для создания сеточной модели на основе поверхностной сетки с применением прямоугольных или треугольных элементов;

- модуль TETRA. Предназначен для создания сеточной модели на основе тетраэдрических объемных сеток (рисунок 3.7);

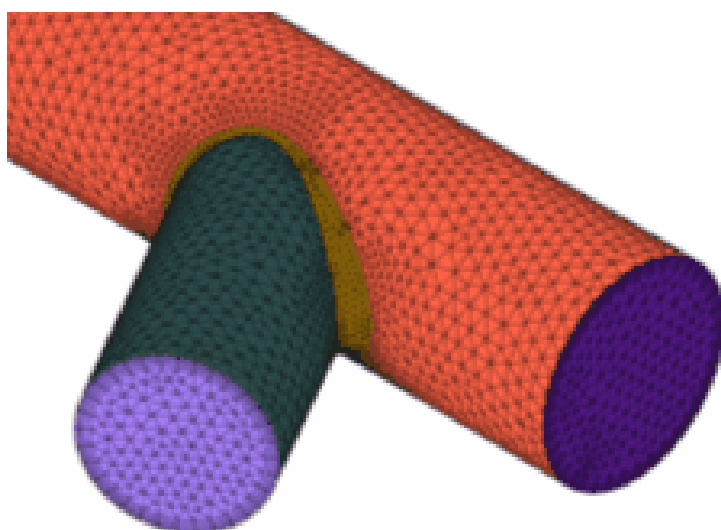


Рисунок 3.7. Пример сеточной модели на основе тетраэдрической сетки

- модуль PRISM. Предназначен для корректировки тетраэдрической сетки с применением призматического подслоя. Такой приём применяется для более точного описания пристеночных течений;

- модуль HEXA. Предназначен для создания сеточной модели на основе структурированных многоблочных или неструктурированных гексагональных сеток (рисунок 3.8);

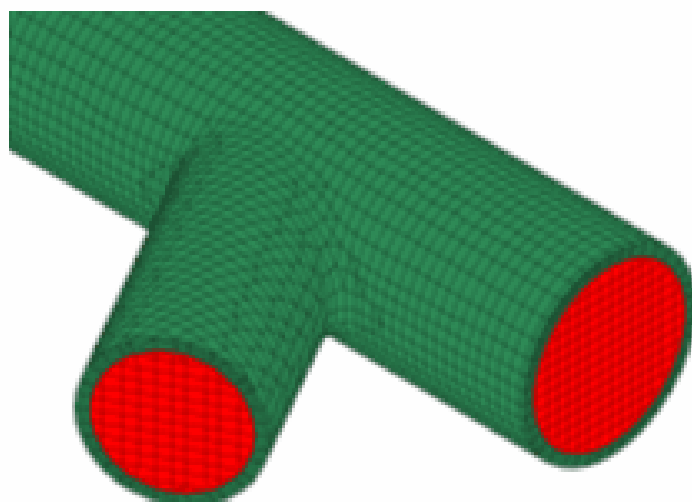


Рисунок 3.8. Пример сеточной модели на основе гексаэдрической сетки

- модуль Hybrid Meshes. Предназначен для создания гибридной сетки при объединении разных типов сеток;

- препроцессор. Предназначен для задания необходимых граничных условий. Данный этап является завершающим при создании расчётной модели для численного моделирования. Далее расчётная модель передается непосредственно в решатель;

- постпроцессор. Предназначен для обработки, визуализации и анализа полученных данных в результате численного моделирования;

Кроме указанного, программный пакет ANSYS ICEM CFD обладает инструментами для оценки и анализа качества сетки, конвертирования элементов сетки из одного типа в другой.

При решении поставленной в работе задачи на базе геометрической модели (рисунок 3.6) в программном пакете ANSYS ICEM CFD была разработана сеточная модель на основе структурированной гексаэдрической сетки (рисунок 3.9) [12].

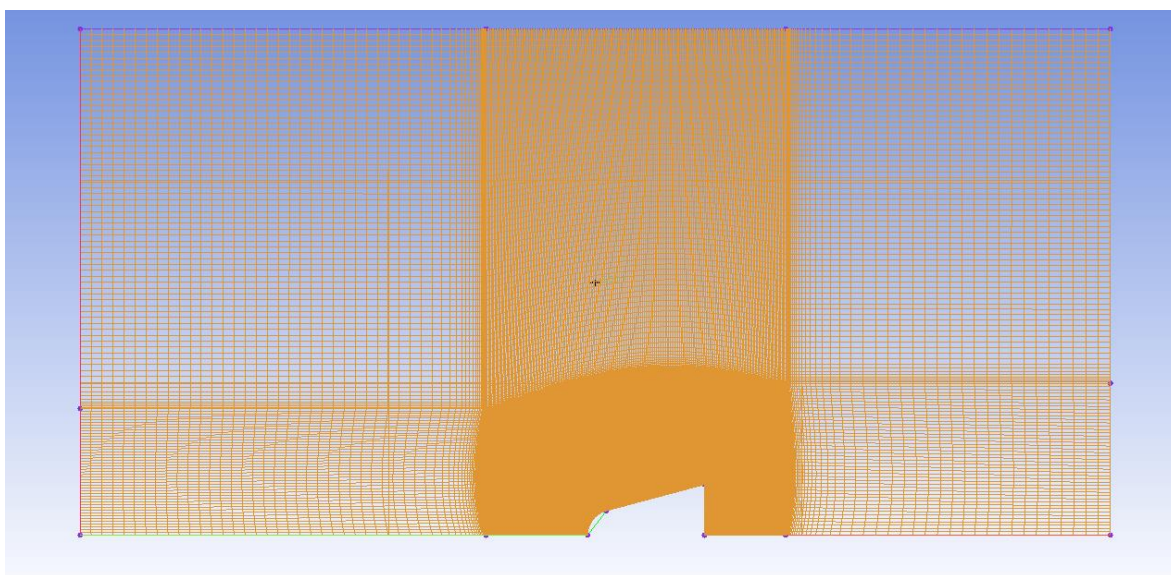


Рисунок 3.9. Разработанная для расчёта сеточная модель

К основным преимуществам использования структурированных сеток можно отнести малое время счёта по сравнению с неструктурированными. Кроме того, использование структурированных сеток позволяет быстро изменять параметры сеточной модели, а также проводить детальный контроль ячеек при

создании сетки. Это, в свою очередь, даёт возможность для более тщательной проработки зон геометрической модели, обладающих характерными особенностями (например: зона скачка уплотнения, отрывная зона и др.) [12].

Для лучшего разрешения пристеночного пограничного слоя на поверхности ЛА было применено сгущение сетки (рисунок 3.10) [12].

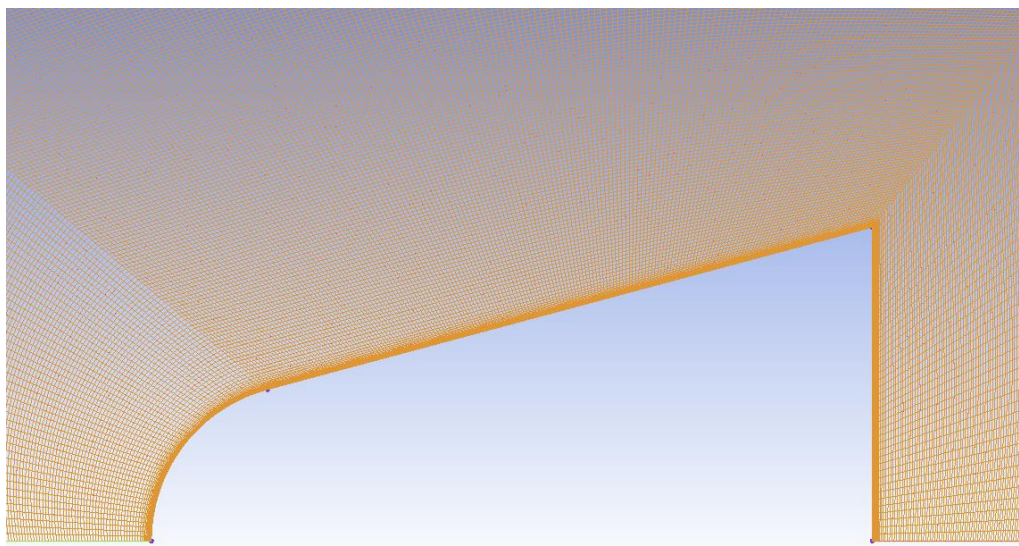


Рисунок 3.10. Структурированная гексаэдрическая сетка со сгущением ячеек по поверхности ЛА

На следующем этапе создания расчётной модели задаются условия однозначности, то есть параметры, определяющие свойства домена: модель газа, модель турбулентности и граничные условия.

Модель газа:

- род газа – воздух;
- начальные условия: $T_{нач}=216,66\text{ К}$, $P_{нач}=5526\text{ Па}$; $V_{нач}=50\text{ м/с}$.

В качестве граничных условий (рисунок 3.11) на «входе» расчётной области задавались значения скорости $V=1800\text{ м/с}$ ($M \approx 6$), температуры $T=216,66\text{ К}$ и давления $P=5526\text{ Па}$. Массовая концентрация частиц в потоке, задавалась 10-ю % от массовой концентрации газовой фазы. Также определялся закон распределения диаметров частиц по площади входного сечения [12].

На остальных границах расчётной области задавались следующие условия [12]:

- на поверхности - условие типа «стенка»;
- учитывалась симметрия тела;
- сверхзвуковой выход и свободный выход при параметрах атмосферы на высоте полёта ЛА: $H = 20 \text{ км}$; $T=216.66 \text{ К}$, $P=5526 \text{ Па}$.

Необходимо отметить, что значение скорости набегающего потока на границе «вход» повышалось постепенно до требуемой величины – $M=6$.

Материал «К-фазы» - SiO_2 (двуокись кремния).

По форме все частицы в каждом вычислительном эксперименте считались однородными шарами диаметрами от 1 до 30 мкм. Взаимодействие твердой фазы с поверхностью ЛА считалось абсолютно упругим.

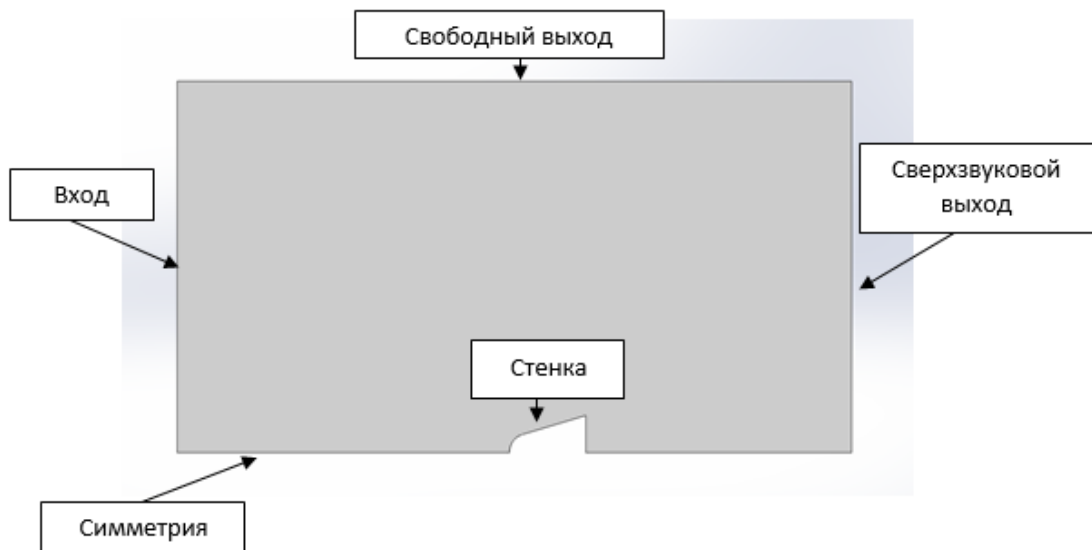


Рисунок 3.11. Граничные условия

Одним из важных аспектов при численном моделировании задач газовой динамики является выбор модели турбулентности. Данная проблема возникает по причине отсутствия универсальной модели турбулентности, то есть каждая модель турбулентности имеет границы применимости. Необходимо отметить, что от выбора модели турбулентности зависят параметры сеточной модели такие как: минимальный размер ячейки на поверхности обтекаемого тела, соотношение

сторон ячеек сеточной модели и так далее. При решении поставленной задачи применялась модель турбулентности SST.

3.3.1. Проведение математического моделирования и анализ результатов

В работе первый этап математического моделирования выражался в проведении расчётов математической модели, описывающей процесс обтекания высокоскоростным гомогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Параметры набегающего потока представлены в постановке задачи.

Результаты численного моделирования приведены на рисунках 3.12 ÷ 3.14. Они позволяют судить об адекватности построенной расчётной модели, о соответствии заданных условий однозначности параметрам поставленной задачи, а также о параметрах набегающего гомогенного потока вблизи поверхности ЛА.

Из представленных результатов видно, что Число Маха изменяется по поверхности сферы от 0 (в передней критической точке - ПКТ) до 1 (звуковая линия – $\alpha=45^\circ$). Параметры торможения в ПКТ: давление торможения – $P^*=2,645 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура торможения – $T^*=1781 \text{ К}$ [12].

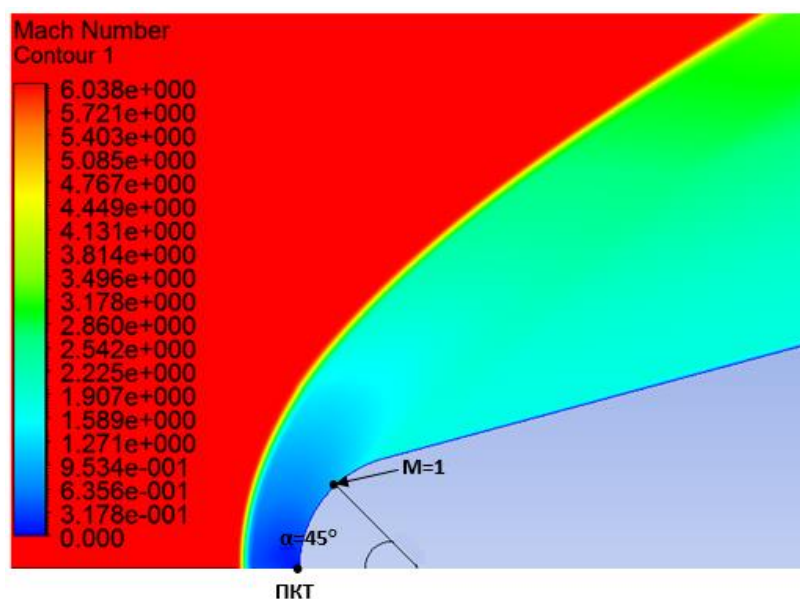


Рисунок 3.12. Визуализация результатов численного моделирования – распределения числа Маха в расчётной области

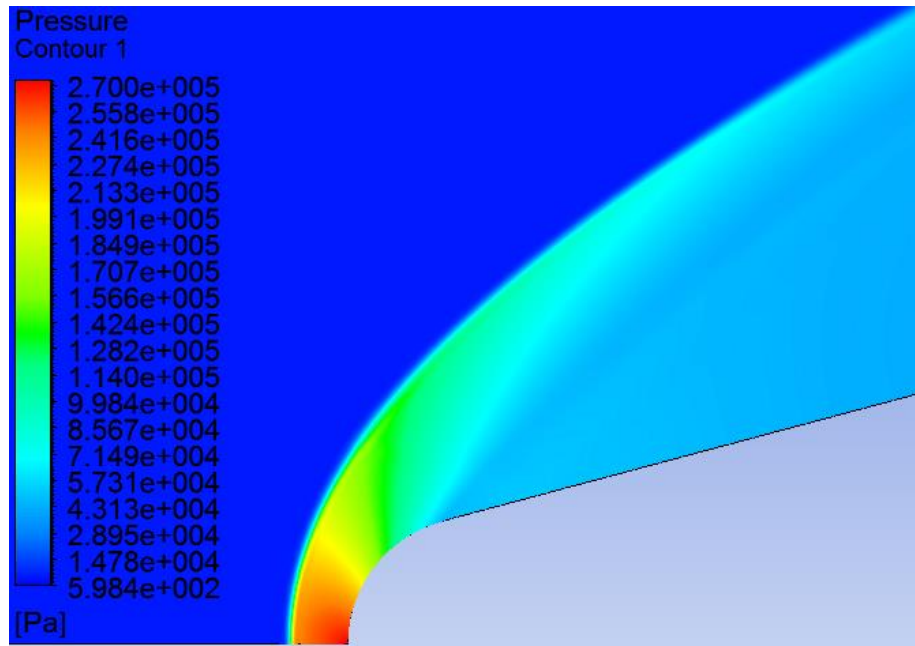


Рисунок 3.13. Визуализация распределения результатов численного моделирования – распределения поля давления в расчётной области

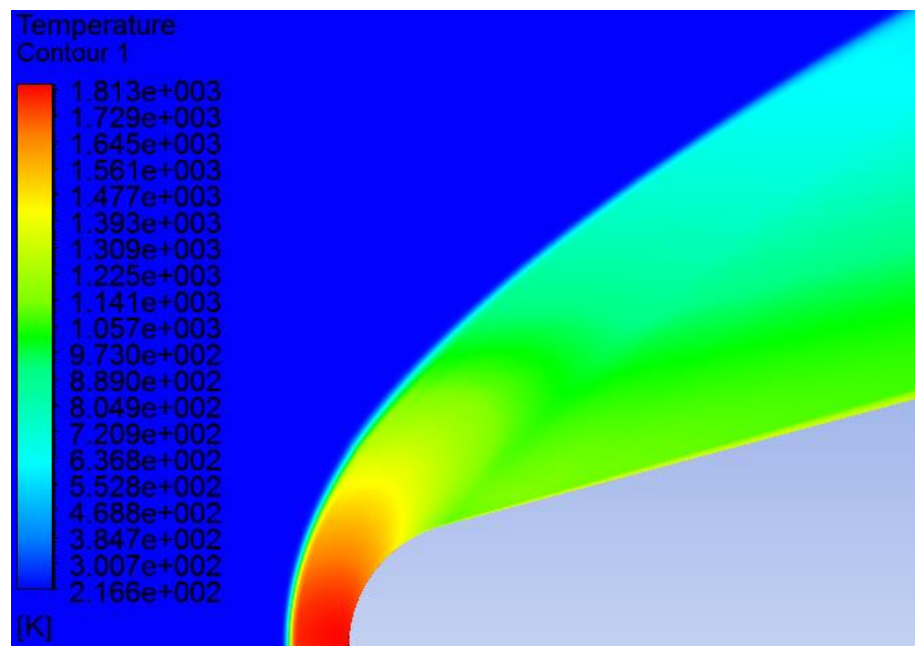


Рисунок 3.14. Визуализация результатов численного моделирования – распределение поля температуры в расчётной области

С использованием разработанной математической модели проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой [12].

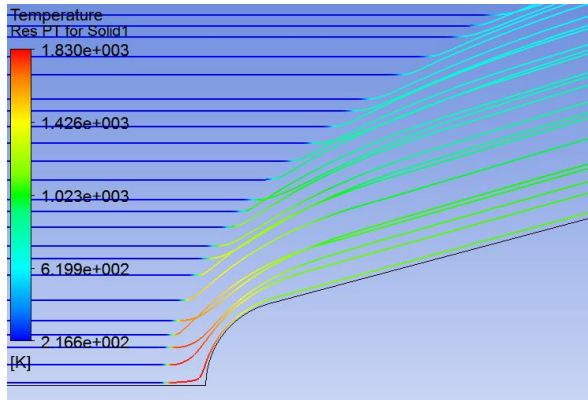
Для оценки влияния размеров «К-фазы» на физическую картину протекания исследуемого процесса численное моделирование проводилось для разной дисперсности частиц.

В этой связи полидисперсность частиц разделена на три группы [12]:

- первая группа – частицы дисперсностью $d_p = 1 \div 10$ мкм;
- вторая группа – частицы дисперсностью $d_p = 11 \div 20$ мкм;
- третья группа – частицы дисперсностью $d_p = 21 \div 30$ мкм.

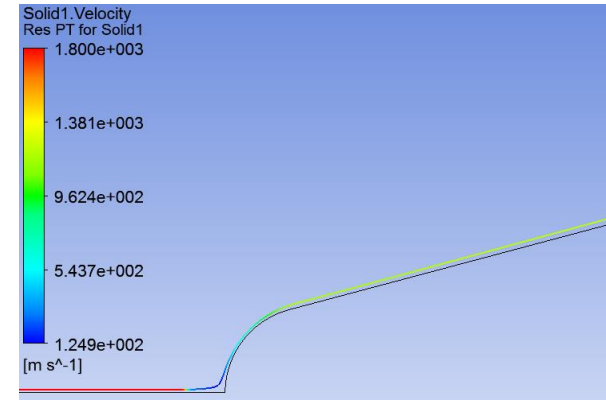
Результаты численных экспериментов представлены на рисунках 3.15÷3.19. Для большей наглядности визуализация результатов для каждой группы частиц включала:

- картину траекторий течения всех полидисперсных частиц вблизи поверхности КЛА;
- картину траектории течения вблизи поверхности КЛА выбранной частицы из каждой группы;
- графиков изменения параметров несущей фазы и выбранной частицы из каждой группы «К-фазы».

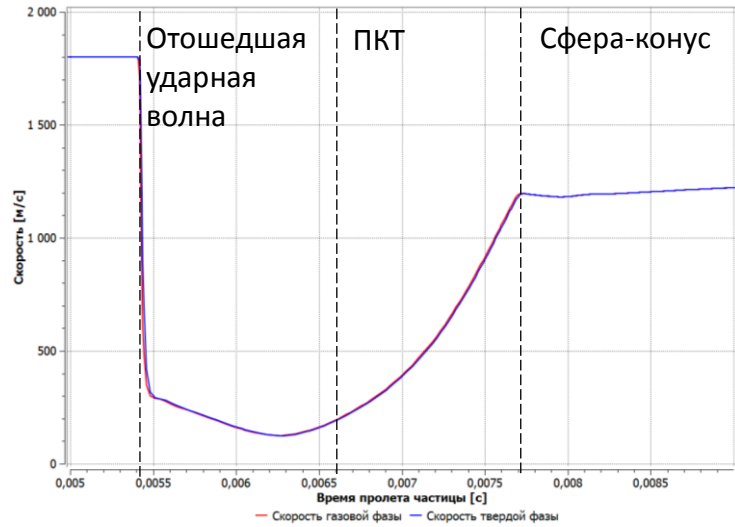
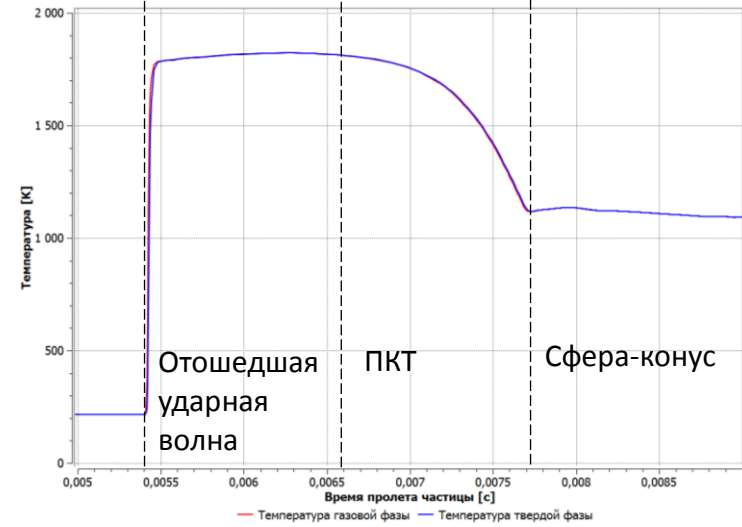


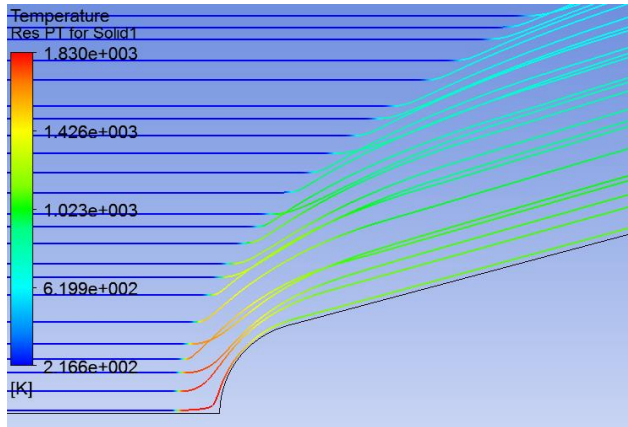
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

б) Траектория частицы $d = 1,72$ мкм

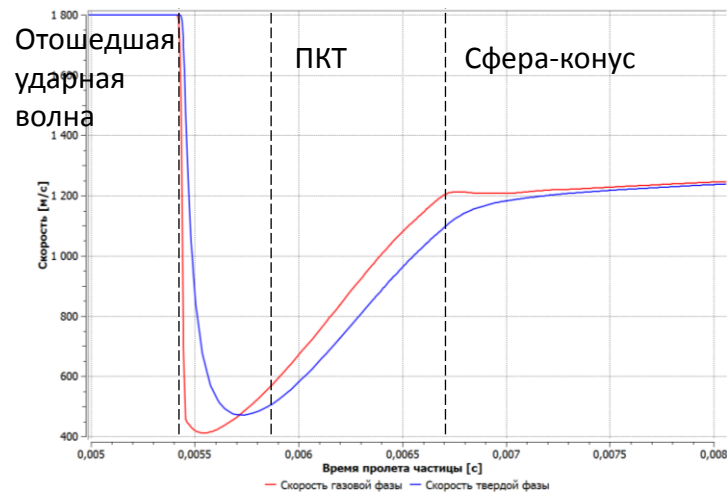
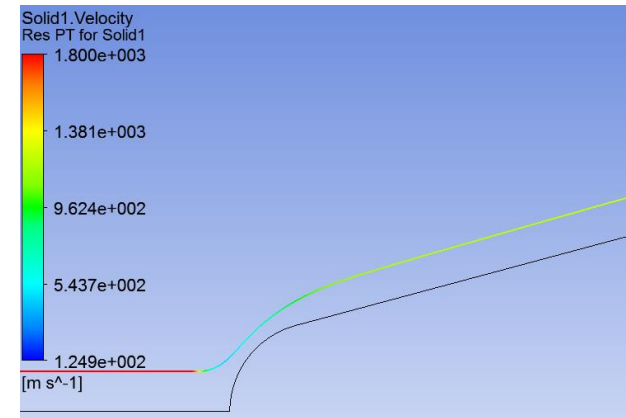
(заливка цветом по значению скорости частицы)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 1,72$ мкм)г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 1,72$ мкм)Рисунок 3.15. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц $d = 1-5$ мкм

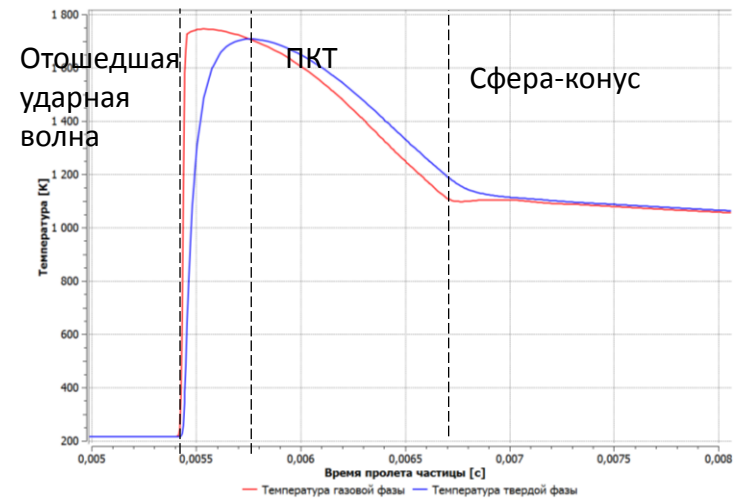


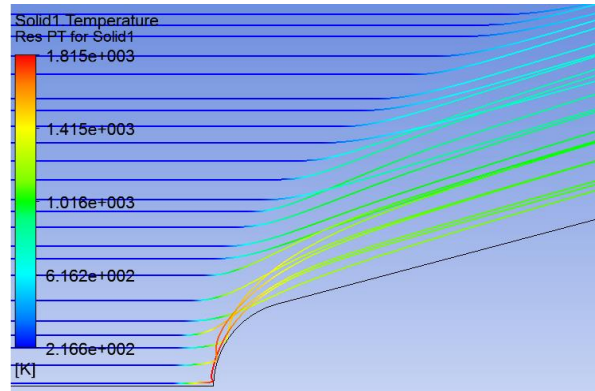
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 9$ мкм)б) Траектория частицы $d = 9$ мкм

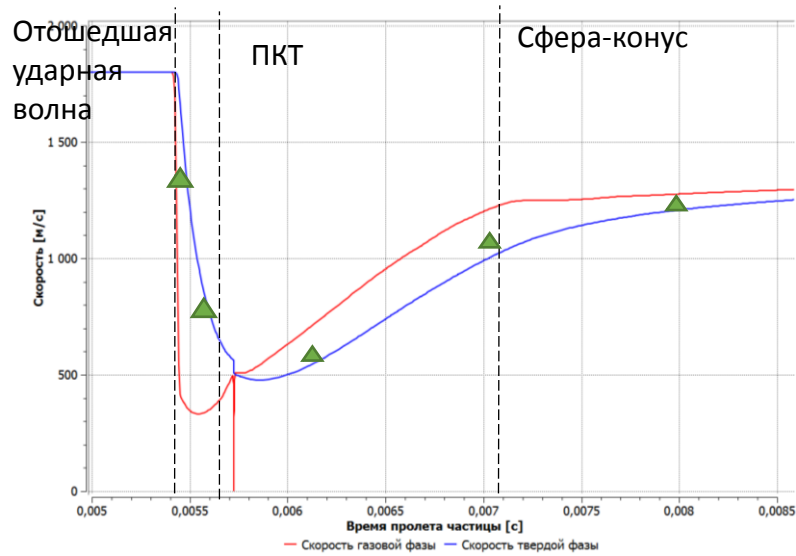
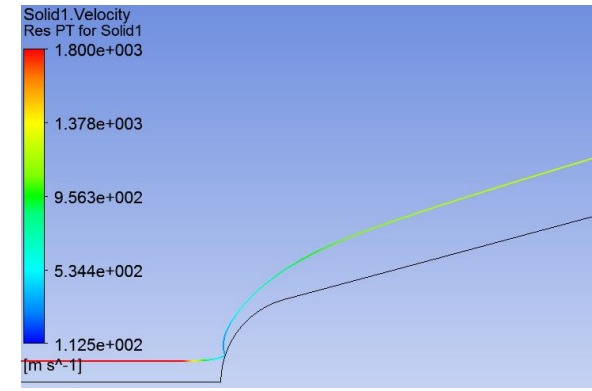
(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 9$ мкм)Рисунок 3.16. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц $d = 5-10$ мкм

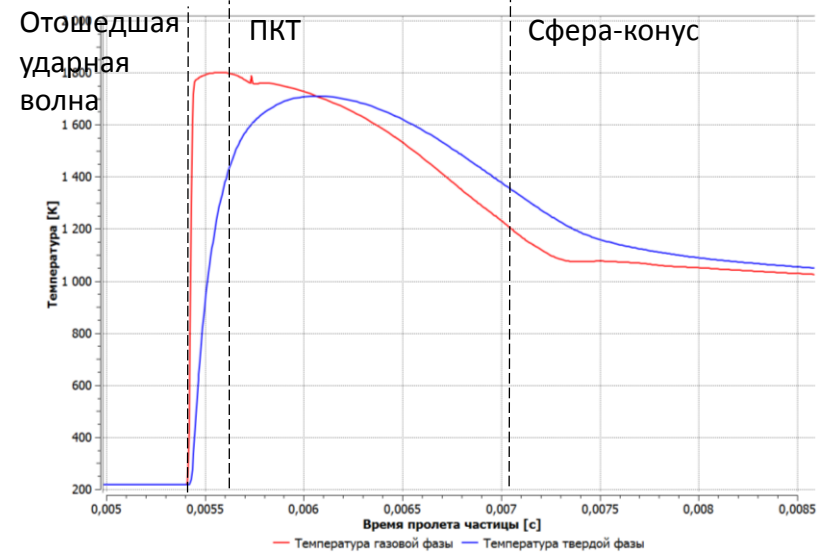


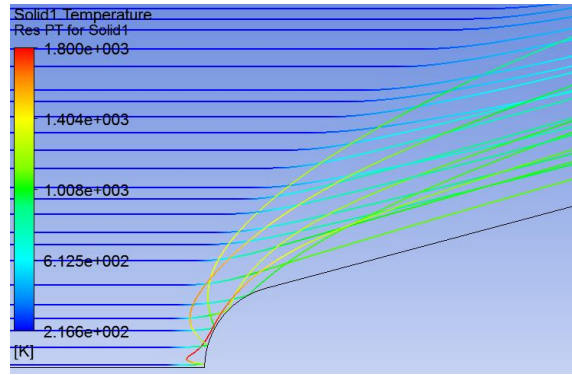
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 15,8$ мкм)б) Траектория частицы $d = 15,8$ мкм

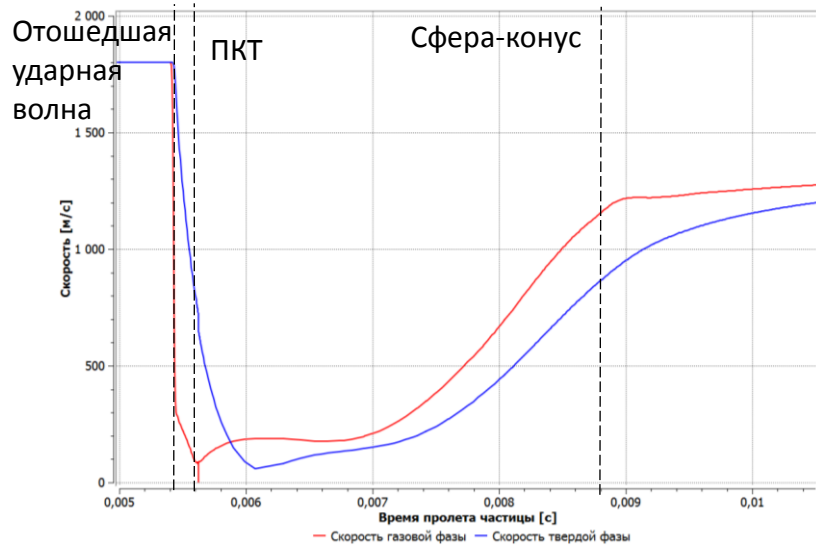
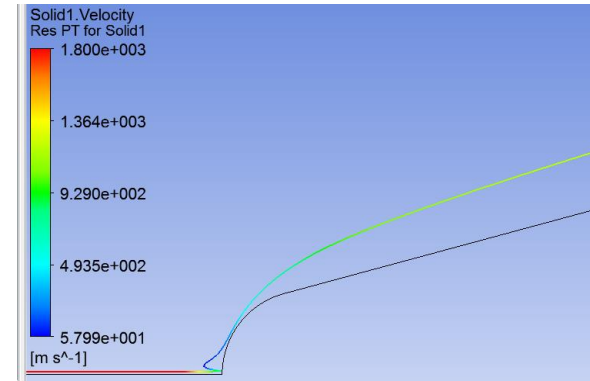
(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 15,8$ мкм)Рисунок 3.17. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц $d = 11-20$ мкм

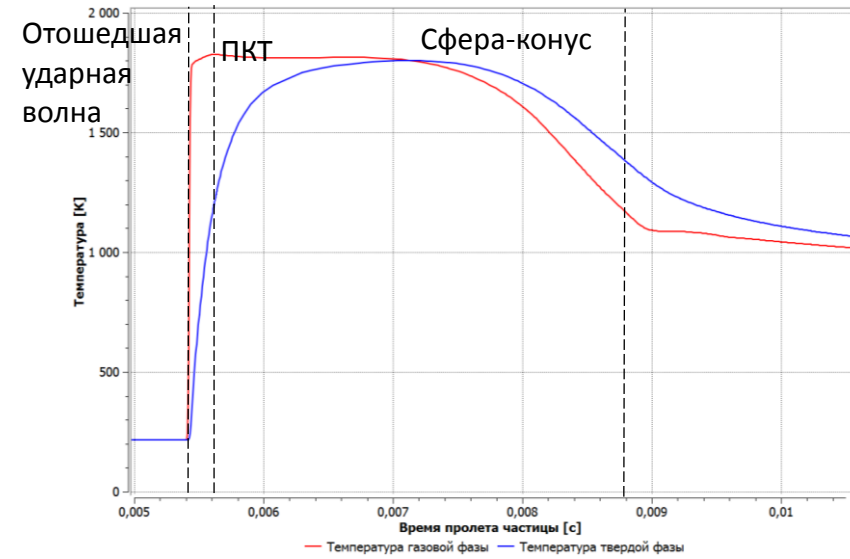


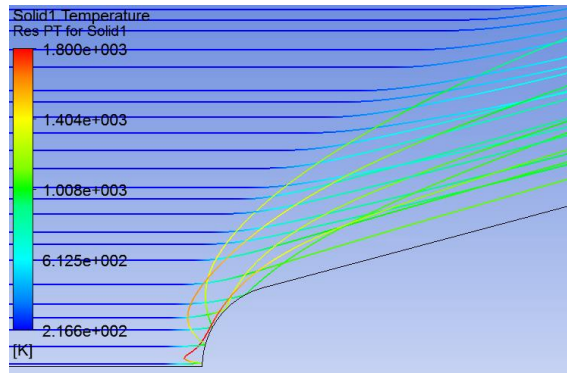
а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 21,7$ мкм)б) Траектория частицы $d = 21,7$ мкм

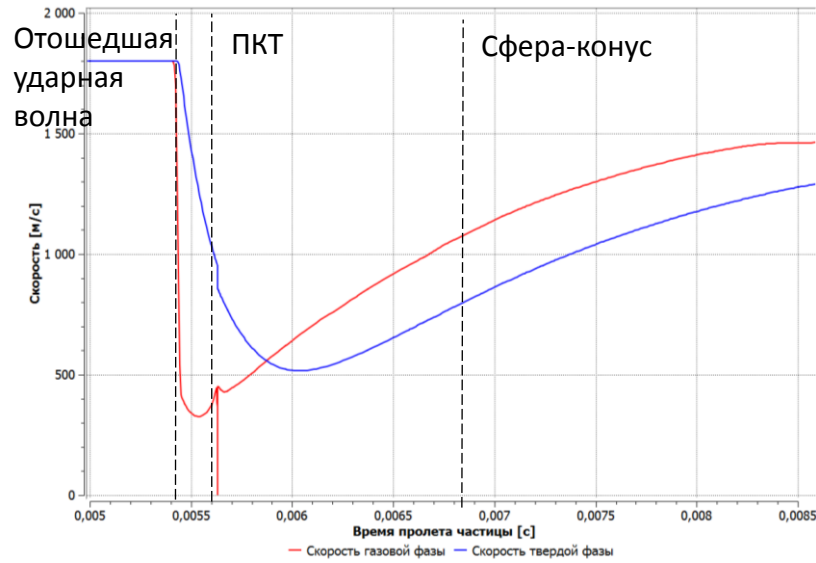
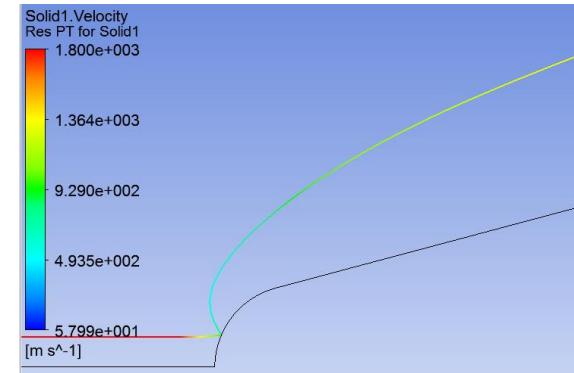
(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 21,7$ мкм)Рисунок 3.18. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц $d = 20-25$ мкм

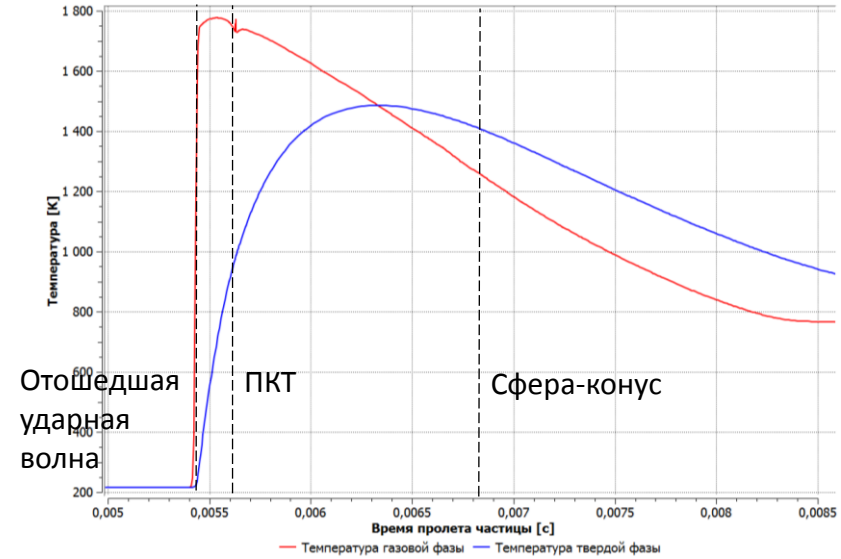


а) Траектории течения частиц вблизи КЛА

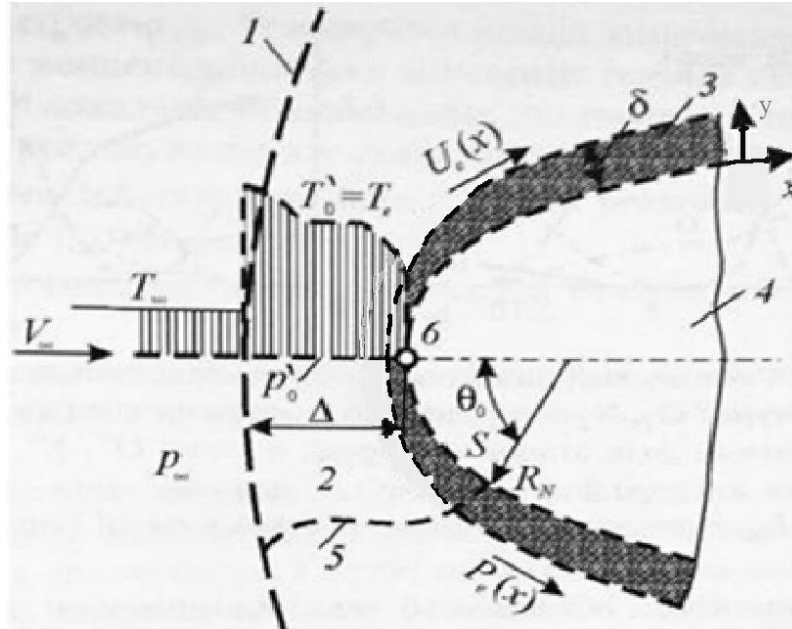
(заливка цветом по значениям температуры частиц)

в) Скорость газовой и твердой фазы (частица $d = 28,9$ мкм)б) Траектория частицы $d = 28,9$ мкм

(заливка цветом по значению скорости частицы)

г) Температура газовой и твердой фазы (частица $d = 28,9$ мкм)Рисунок 3.19. Результаты вычислительного эксперимента для размеров частиц $d = 25-30$ мкм

Из анализа полученных результатов видно, что при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой (рисунок 3.20) [2, 47].



1 – ударная волна, 2 – зона невязкого течения за ударной волной, 3 – пограничный слой, 4 – затупленной тело, 5 – линия перехода через скорость звука, 6 – точка торможения, Δ – толщина сжатого слоя, δ – толщина пограничного слоя, $T_0' = T_e$ – температура потока за ударной волной, θ – угловая координата, T_∞ и V_∞ – температура и скорость невозмущенного потока

Рисунок 3.20. Картина обтекания затупленного тела в окрестности точки торможения.

Несущая фаза, проходя через ударную волну, замедляется и резко меняет свои параметры. Образуется так называемый сжатый (ударный) слой газа с повышенной плотностью. В следствие вязкости газа и торможения частиц происходит переход кинетической энергии потока в тепловую. Течение между поверхностью тела и ударной волной дозвуковое, но по мере движения вдоль тела поток вновь разгоняется и по прохождении так называемой звуковой линии становится сверхзвуковым [47, 57]. Соответственно, параметры твердой фазы

изменяются аналогично, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно. Как видно из представленных результатов инерционность «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы. На протяжении всего сжатого слоя и вдоль тела параметры твёрдой фазы «стремятся» достичь величин параметров газовой фазы [12].

При рассмотрении графических иллюстраций результатов численного моделирования для частиц, которые соударяются с поверхностью КЛА (рисунки 3.17÷3.19), следует отметить следующую особенность. В программном комплексе ANSYS CFX скорость предполагается постоянной в пределах контрольного объема. Это постоянное значение хранится в узле контрольного объема. И хотя узел половинного пристенного контрольного объема лежит строго на стенке, скорость в нем ненулевая, чтобы обеспечить консервативность. То есть мы задаем нулевую скорость на стенке, но, поскольку первая ячейка на стенке имеет конечные размеры, "средняя" скорость в ней не равна нулю [12]. Поэтому в ANSYS CFX существует два варианта переменных [54]:

1) «Hybrid»: в этом случае значения переменных строго соответствуют граничным условиям. Например, скорость, вычисленная на стенке с прилипанием, будет всегда равна скорости стенки.

2) «Conservative»: в этом случае значения переменных не строго соответствуют граничным условиям, но стремятся к заданным значениям при сгущении сетки.

Если вычислить скорость, то она не будет равна скорости стенки, однако обеспечит консервативность при вычислениях.

Ввиду вышесказанного, обращаем внимание на то, что для переменных, обозначающих параметры «К-фазы», в программном комплексе Ansys CFX нет значений в формате «Hybrid», поэтому на графических иллюстрациях в моменты времени, соответствующие соударению частицы и поверхности КЛА, скорость «К-фазы» не равна нулю [12].

Выводы по главе 3

1. Сформулирована постановка задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. Указаны основные параметры гетерогенного потока и высокоскоростного ЛА;
2. Разработана математическая модель газовой фазы и «К-фазы» для решения поставленной задачи;
3. Выбран инструмент для решения поставленной задачи. Произведен критический анализ CFD комплекса ANSYS CFX. Выделены особенности численного решения математической модели поставленной задачи;
4. Разработана расчётная схема для решения задачи с использованием предложенной математической модели обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой;
5. Проведена серия вычислительных экспериментов для наборов частиц разной дисперсности.
6. Произведена визуализация и анализ полученных результатов. Показано, что:
 - при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой;
 - параметры твердой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;
 - скорость изменения параметров «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы.

4. МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под воздействием набегающего высокоскоростного гетерогенного потока, содержащего жидкие или твёрдые частицы, обтекаемая поверхность тела подвергается механическому эрозионному разрушению. С подобной проблемой приходится сталкиваться в разных областях техники. Например, при эксплуатации парогазовых турбин, несущих винтов вертолетов, элементов конструкции ЛА, подвергающихся воздействию высокотемпературной гетерогенной струи РДТТ. Особенно интенсивно подвергаются механической эрозии высокоскоростные летательные аппараты, преодолевающие дождевую и пылевую облачность и др.

Все эти вредные процессы должны быть сведены к минимуму. В этой связи механизм эрозионного разрушения конструкционных материалов должен быть тщательно смоделирован на лабораторных стендах с воспроизведением реальных условий воздействия.

На первом этапе значительная часть таких исследований направлена на изучение процессов при единичном ударе высокоскоростной частицы о твёрдую поверхность, как наиболее простую форму взаимодействия. Подобные исследования проводятся на баллистических стендах, поскольку на таких стендах можно максимально приближено к реальным условиям, реализовать физические процессы, сопутствующие единичному удару частицы о поверхность преграды. Интенсивность таких процессов определяются массой, формой и скоростью соударяющихся тел.

Однако в реальных условиях эксплуатации высокоскоростных ЛА при преодолении аппаратом гетерогенных атмосферных аномалий механизм взаимодействия гетерогенного потока с элементами его конструкции более сложный. Исследование этого механизма, сочетающего комплекс физических и

теплотехнических процессов, также проводится на газодинамических стендах, воспроизводящих высокоскоростные гетерогенные потоки.

При реализации комплекса указанных процессов в ходе взаимодействия кинетическая энергия падающих частиц расходуется:

- на нагревание частицы и преграды при ударе;
- на кинетическую энергию осколков соударяющихся тел;
- на энергию образования кратера, его размера и форму;
- на энергию эжекции массы из кратера, и др.

Весь этот комплекс энергетических переходов определяет механизм механической эрозии поверхности конструкционных материалов, а следовательно, и конструкции ЛА. Вот почему сегодня остро стоит проблема изучения этих процессов, выявления их механизма с целью снижения до минимума механическую эрозию.

В последующих разделах работы проводится анализ исследований, выполненных как самим автором, так и заимствованных из опубликованных работ.

4.1. Физическая модель процессов взаимодействия твёрдых частиц с поверхностью

Механизм взаимодействия сверхзвукового гетерогенного потока с твердой поверхностью включает в себя комплекс физико-химических процессов: пластическую деформацию, нагрев, химические и фазовые переходы материалов частиц и преграды. Во время взаимодействия высокоскоростного гетерогенного потока с преградой кинетическая энергия твердой частицы затрачивается на реализацию данного комплекса физико-химических процессов. При этом уравнение баланса энергии в момент удара частицы о твёрдую поверхность представляется в виде [1, 2]:

$$E_{кин.р} = E_{деф.р} + E_{деф.пр} + E_{наг.р} + E_{наг.пр} + E_{эр.пр} , \quad (4.1)$$

где $E_{кин.р}$ – кинетическая энергия частицы, $E_{деф.р}$ и $E_{деф.пр}$ – энергии деформации частицы и преграды, $E_{наг.р}$ и $E_{наг.пр}$ – энергия нагрева частицы и преграды, $E_{эр.пр}$ – энергия, затраченная на механическую эрозию преграды.

В соотношении (4.1) последнее слагаемое представляет вид энергии, затраченной на разрушение поверхностного слоя конструкционного материала. Данный вид энергии является определяющим и вызывает научный и практический интерес исследователей, поскольку создаваемая промышленностью техника в большинстве случаев предназначена для эксплуатации в гетерогенных средах. В этой связи знание характеристик эрозионного разрушения конструкционных материалов, а также методов оценки этих характеристик позволит конструкторам создавать надёжную технику. Особенно остро эта задача стоит перед разработчиками высокоскоростных летательных аппаратов. В связи с указанным, настоящая диссертационная работа посвящена исследованию именно этой задачи. Однако прежде чем приступить к глубокому анализу непосредственно процессов эрозионного разрушения конструкционных материалов, на первом этапе приходится исследовать физическую природу процессов, сопутствующих начальной стадии удара высокоскоростной частицы о твёрдую стенку. Понятно, что эта стадия взаимодействия представляет собой физическую модель нескольких процессов взаимодействия частицы и поверхности конструкционного материала. Совокупность этих процессов представлена уравнением (4.1) баланса энергии в момент удара частицы о твёрдую поверхность.

В представленном уравнении энергия нагрева «К-фазы» и преграды газом-носителем учитываются в неявном виде, а именно параметрами, определяющими механические свойства материалов «К-фазы» и преграды.

Кинетическая энергия частицы в момент удара о преграду определяется соотношением:

$$E_{кин.р} = 0.5 \cdot m_p \cdot V_p^2, \quad (4.2)$$

где m_p – масса частицы.

Если частица не разрушается при ударе, то энергия деформации частицы – это энергия, которая расходуется на изменение формы частицы. Конечная форма

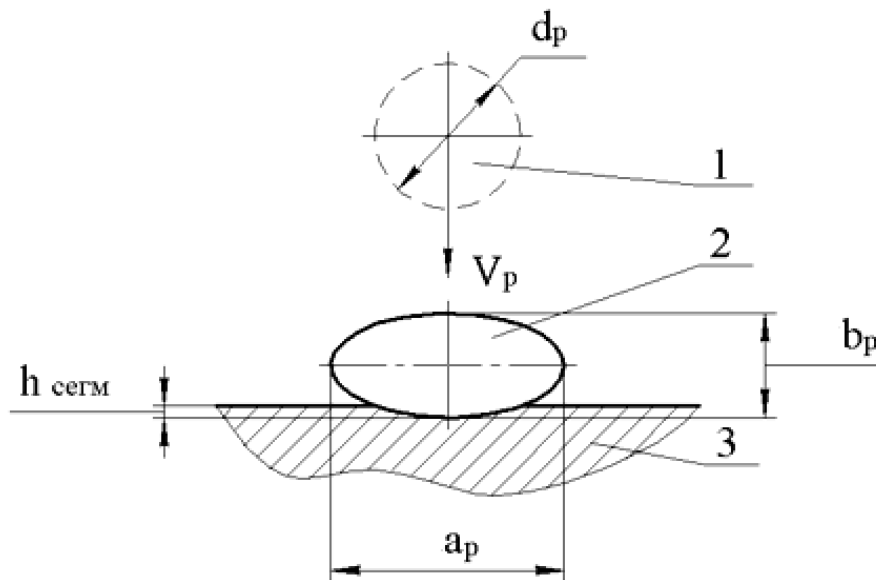
частицы при взаимодействии с преградой зависит от ее скорости V_p в момент соударения и рода материала:

- при скоростях $V_p < 1000$ м/с конечная форма частицы близка к эллипсоидной;
- при скоростях $V_p > 1000$ м/с – к дисковой.

При проникновении частицы в преграду на небольшую глубину (рисунок 4.1) энергия деформации частицы в основном затрачивается на преодоление сил сопротивления текучести. Процесс растекания частицы при этом проходит без сопротивления окружающей среды [9, 58]. Поэтому выражения для определения данного вида энергии можно представить в следующем виде:

$$E_{\text{деф. } p} = \sigma_T \cdot \Delta F_p (d_p - 2b_p), \quad (4.3)$$

где ΔF_p – изменение площади боковой поверхности частицы за счет деформации, σ_T – предел текучести материала частицы, b_p – высота частицы после деформации.



1 – форма частицы до удара, $R_{сф}$ – радиус, V_p – скорость частицы в момент удара о преграду, 2 – сегментальная форма частицы после удара, b_p – высота сегмента, $h_{сегм}$ – глубина проникновения частицы 1 в преграду 3

Рисунок 4.1. Деформации металлической частицы при ударе о твердую поверхность

Энергия деформация преграды – это энергия, затраченная на пластическое сжатие материала преграды при взаимодействии с частицей. Соответственно, на величину данной энергии будут влиять два параметра – глубина проникновения частицы $h_{сегм}$ и сила сопротивления сжатию со стороны материала преграды $\bar{P}_{сomp}$:

$$E_{деф.пр} = \bar{P}_{сomp} \cdot h_{сегм}. \quad (4.4)$$

Так как деформация преграды происходит на начальном этапе соударения с частицей, когда частица ещё не подвергнута деформации, то есть имеет сферическую форму. Для определения глубины проникновения частицы $h_{сегм}$ можно воспользоваться методом сферы Бринелля [59]. Такой подход позволил получить зависимость для расчета $E_{деф.пр}$ в виде:

$$E_{деф.пр} = 2\pi h_{сегм}^2 \cdot d_p \cdot H_\beta, \quad (4.5)$$

где H_β - твердость материала преграды.

Доли энергии, расходуемые на нагрев частицы $E_{наг.р}$ и нагрев преграды $E_{наг.пр}$ при их взаимодействии можно вычислить с помощью выражений (4.6) и (4.7), соответственно:

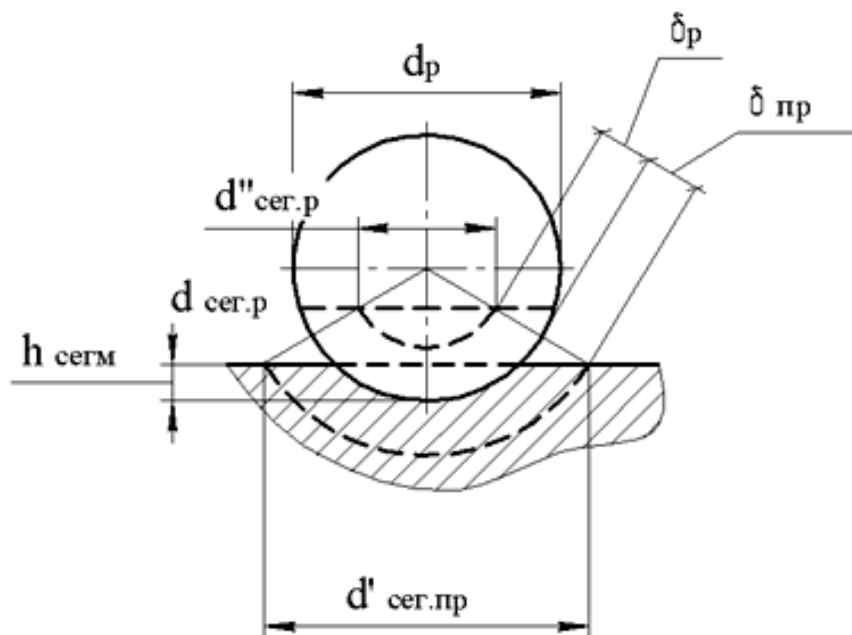
$$E_{наг.р} = m_{\tau,р} \cdot c_p (\bar{T}_{\tau,р} - T_{нач.р}), \quad (4.6)$$

где $m_{\tau,р}$ – доля прогретой массы частицы за время удара $\tau_{уд}$, $\bar{T}_{\tau,р}$ – среднemasсовая температура прогретого участка частицы, c_p – удельная теплоемкость материала частицы при $\bar{T}_{\tau,р}$, $T_{нач.р}$ – температура частицы до удара;

$$E_{наг.пр} = m_{\tau,пр} \cdot c_{пр} (\bar{T}_{\tau,пр} - T_{нач.пр}), \quad (4.7)$$

где $m_{\tau,пр}$ – доля прогретой массы преграды за время удара τ , $\bar{T}_{\tau,пр}$ – среднemasсовая температура прогретого участка преграды, $c_{пр}$ – удельная теплоемкость материала преграды при температуре $\bar{T}_{\tau,пр}$, $T_{нач.пр}$ – температура подложки перед ударом.

На рисунке 4.2 представлена схема нагрева частицы и преграды при их соударении.



d_p – исходный диаметр частицы, $h_{сегм}$ – глубина проникновения частицы в преграду, $d'_{сег.п.р.}$ – диаметр сегмента деформации преграды, $d_{сег.п.}$ – диаметр прогретого сегмента частицы, $d''_{сег.п.}$ – диаметр непрогретого сегмента частицы, $d'_{сег.п.р.}$ – диаметр прогретого сегмента преграды, δ_p – глубина прогрева частицы, $\delta_{подл}$ – глубина прогрева преграды

Рисунок 4.2. Схема нагрева частицы и преграды при их соударении

Для определения массы прогретой частицы и массы прогретой преграды за время удара $\tau_{уд}$ воспользуемся выражениями (4.8) и (4.9), соответственно [1]:

$$m_{\tau,p} = 2\pi R_p \cdot \delta_p (h_{сег.} - \delta_p) \cdot \rho_p, \quad (4.8)$$

где ρ_p – плотность материала частицы.

$$m_{\tau,п.р.} = \pi R_p \cdot \delta_{п.р.} (3h_{сег.} + \delta_{п.р.}) \cdot \rho_{п.р.}, \quad (4.9)$$

где $\rho_{п.р.}$ – плотность материала преграды.

Глубина прогрева частицы и преграды, согласно теории нестационарной теплопроводности, зависит от коэффициента температуропроводности материалов частицы a_p и преграды $a_{п.р.}$ и времени экспозиции $\tau_{уд}$:

$$\delta_p = \sqrt{a_p \cdot \tau_{y\delta}}; \quad (4.10)$$

$$\delta_p = \sqrt{a_{np} \cdot \tau_{y\delta}}. \quad (4.11)$$

Длительность удара жидкой частицы о преграду можно оценить с помощью выражения [60]:

$$\tau_{y\delta} = \frac{(d_p - h_{\text{деф}})}{V_{0,p}} = \frac{d_p (1 - \varepsilon)}{V_{0,p}}, \quad (4.12)$$

где ε – степень деформации частицы.

В случае взаимодействия преграды с твердой частицей необходимо учесть отличие скорости деформации твердой частицы $V_{\text{деф.}p}$ от скорости деформации жидкой частицы $V_{0,p}$:

$$V_{\text{деф.}p} = V_{0,p} \frac{P_{\text{нов}}}{\sigma_{T,p}}, \quad (4.13)$$

где $P_{\text{нов}}$ – поверхностное давление жидкой частицы, обусловленное поверхностным натяжением, $\sigma_{T,p}$ – предел текучести материала твердой частицы.

Поверхностное давление жидкой частицы определяются соотношением Лапласа в виде:

$$P_{\text{нов}} = \frac{4\sigma_{\text{нов}}}{d_{p,\text{ж}}}, \quad (4.14)$$

где $\sigma_{\text{нов}}$ – поверхностное натяжение жидкой частицы, $d_{p,\text{ж}}$ – диаметр жидкой частицы сферической формы.

С учетом выражения (4.13) и (4.14) получаем выражение для определения времени экспозиции твердой частицы:

$$\tau_{y\delta} = \frac{r_p^2 (1 - \varepsilon_p)}{V_{0,p} \frac{\sigma_{\text{нов}}}{\sigma_{T,p}}}, \quad (4.15)$$

где r_p – радиус частицы, V_p – скорость частицы в момент удара, $\varepsilon_p = \frac{2b}{d_p}$ – степень деформации частицы (определяется экспериментально).

Для определения величины энергии, затраченной на эрозию преграды ($E_{эп.пр}$), вводится понятие энтальпии эрозии ($I_{эр}$) материала преграды [61]:

$$I_{эр} = \overline{C_p} (T_{w,эр} - T_{нач}) + \Delta Q_{ф.н} + Q_{эр}, \quad (4.16)$$

где $\overline{C_p}$ – средняя удельная теплоемкость материала преграды, $\Delta Q_{ф.н}$ – удельная теплота фазовых переходов (Дж/кг), $Q_{эр}$ – удельная энергия, затраченная на механическое разрушение материала преграды при ударе частиц гетерогенного потока (Дж/кг). В случае, когда при ударе частицы фазовые переходы отсутствуют ($\Delta Q_{ф.н} = 0$), соотношение (4.16) упрощается.

Изменение значений $I_{эр}$ для некоторых конструкционных материалов представлено в последующих разделах данной главы.

На данный момент для большинства материалов остаются неизвестными значения их энтальпий разрушения, поэтому не всегда есть возможность использовать формулу (4.16).

Подставляя в выражение (4.1) зависимости для ее каждого слагаемого, получим окончательный вид уравнения баланса энергии в момент удара частицы о преграду:

$$\begin{aligned} \frac{m_p \times V_p^2}{2} = \Delta F_p \cdot \sigma_\tau (d_p - b_p) + 2\pi h_{сег.}^2 \cdot d_p \cdot H_\beta + \\ + m_{\tau,p} \cdot c_p (\overline{T}_{\tau,p} - T_{нач.p}) + m_{\tau,пр} \cdot c_{пр} (\overline{T}_{\tau,пр} - T_{нач.пр}) + E_{эр.пр}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

С помощью данного уравнение баланса энергии при известных параметрах гетерогенного потока и преграды, а именно: дисперсность «К-фазы», механические и теплофизические свойства материалов «К-фазы» и преграды, скорости частиц в момент удара V_p и их степень деформации ε_p , величину энергии, затраченной на механическую эрозию преграды $E_{эр.пр}$ – просто определить среднемассовые температуры прогретых участков частицы и преграды в момент удара. Необходимо отметить, что в виду малости величины длительности удара частицы о преграду (например, при $V_p = 1000 \text{ м/с}$ – $\tau_{уд} = 10^{-6} \text{ с}$), разница между среднемассовыми температурами прогретых участков частицы и преграды в момент удара незначительна. В связи с этим фактом, данной

разницей можно пренебречь в инженерных расчетах, то есть принять данные величины равными друг другу ($\bar{T}_{\tau,p} \approx \bar{T}_{\tau,np}$).

4.2. Динамика удара частицы о поверхность

В первую очередь, необходимо разделять процессы соударения жидкой и твёрдой частицы с поверхностью преграды, поскольку динамика данных процессов различна.

При рассмотрении гидродинамики удара жидкой частицы о поверхность преграды выделяют два рода давления [60, 62]:

1. Напорное или динамическое давление:

$$P_{дин} = \frac{\rho_p \times V_p^2}{2}; \quad (4.18)$$

2. Импульсное или ударное давление, которое возникает в результате гидравлического удара (действие упругих волн сжатия) в объёме жидкой частицы:

$$P_{уд} = \frac{\rho_p \cdot a_{зв} \cdot V_p}{2}. \quad (4.19)$$

При ударе о поверхность преграды твердой частицы возникает только динамическое давление $P_{дин}$, которое определяется временем экспозиции $\tau_{уд}$ удара.

Например, при скоростях твердой частицы $V_p = 500...1200$ м/с, динамическое давление в зоне контакта на поверхности преграды может достигать значений $\sim 10^{10}$ Па. Данная величина динамического давления гораздо больше максимальных значений механических свойств большинства металлов.

Величину среднего динамического давления в пятне контакта на поверхности преграды при ударе частицы можно оценить с помощью формулы [62, 63]:

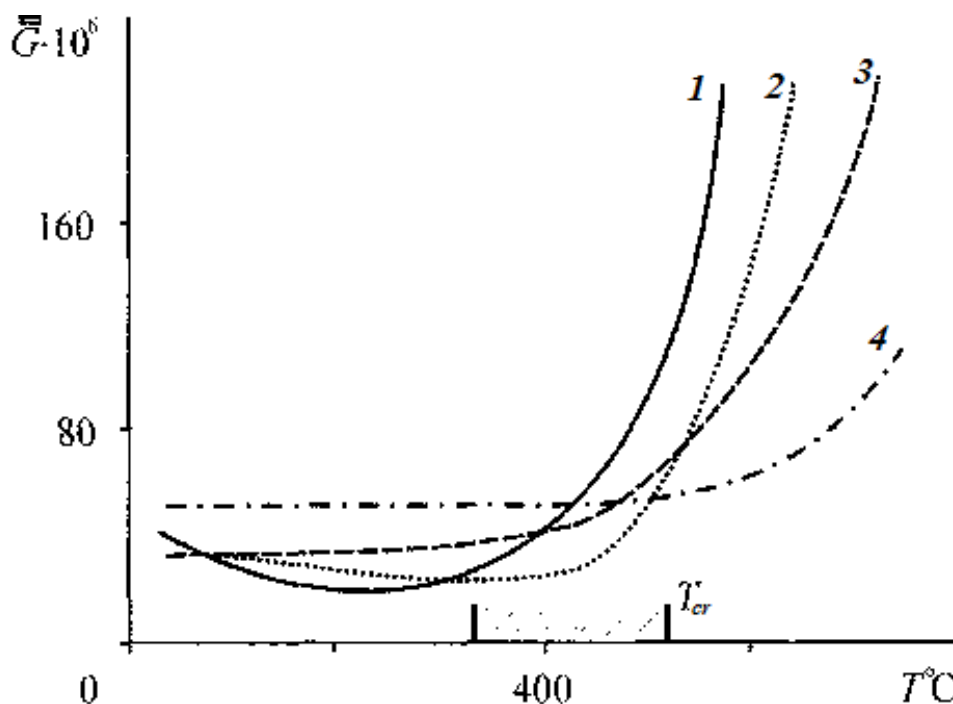
$$P_{дин} = \frac{\rho_p \cdot V_p^2}{2}. \quad (4.20)$$

Например, при соударении твердой алюминиевой частицы, скорость которой $V_p = 500 \text{ м/с}$, с поверхностью преграды, средняя величина динамического давления в пятне контакта достигнет значения $P_{дин} = 340 \text{ МПа}$.

4.3. Анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком

Исследования показывают, что с повышением температуры преграды увеличивается её эрозионное разрушение. При проведении экспериментальных работ увеличение температуры преграды можно реализовать с использованием электрических нагревателей или газодинамического метода, сущность которого заключалась в воздействии на поверхность нагретого гетерогенного потока.

Влияние температуры преграды на безразмерную скорость эрозионного разрушения материала представлено на рисунке 4.3 [61].



«К-фаза»: частицы – песок, $\alpha = 90^\circ$, $d_p = 0.4 \div 0.63 \text{ мм}$, $V_p = 48 \text{ м/с}$

1 – сталь Ст.3, 2 – сталь У8А, 3 – сталь Р9, чугун Х35Л

Рисунок 4.3. Зависимость безразмерной скорости эрозионного разрушения углеродистых сталей и чугуна от температуры подложки

Из анализа полученных экспериментальных данных установлено наличие некоего порогового значения температуры. Например, для каждого рода исследованных конструкционных материалов диапазон изменения порогового значения температуры находится в пределах $T_{cr} \approx 700 \div 900K$.

Видно также, что при температуре преграды ниже T_{cr} интенсивность эрозионного разрушения не увеличивается, а в некоторых случаях даже уменьшается. Но при температуре преграды большей T_{cr} наблюдается резкое увеличение интенсивности эрозионного разрушения [64, 65, 66, 67].

По итогам проведенных исследований можно сделать важный вывод, что сегодня попытки обобщить результаты исследований эрозионного разрушения, взяв за основу фундаментальные свойства материалов преграды, ни к чему не привели, либо из-за сложности получаемой зависимости, либо из-за жестких границ применения разработанной математической модели.

Проанализированные выше данные экспериментальных исследований эрозионного разрушения под воздействием высокоскоростных гетерогенных потоков, относятся в основном к металлическим материалам, их окислам или керамикам.

Количество опубликованных работ, посвященных исследованию проблемы взаимодействия композиционных материалов с высокоскоростными гетерогенными потоками, мало. Например, в монографии [2], синтезирована некоторая подборка данных, которая позволила рекомендовать несколько соотношений для определения величины эрозионного разрушения ряда теплозащитных материалов. Одним из них является эмпирическое соотношение для расчета безразмерно скорости уноса массы графита и углерод-углеродистых композиционных материалов [68]:

$$\bar{G} = k_1 \left(\frac{V_p}{10^4} \right)^a \left(\frac{T_w}{530} \right)^b \left[1 + \frac{k_2}{k_1 m_p \left(\frac{V_p}{10^4} \right)^a \left(\frac{T_w}{530} \right)^b \sin \alpha^d} \right]^c \sin \alpha^d. \quad (4.21)$$

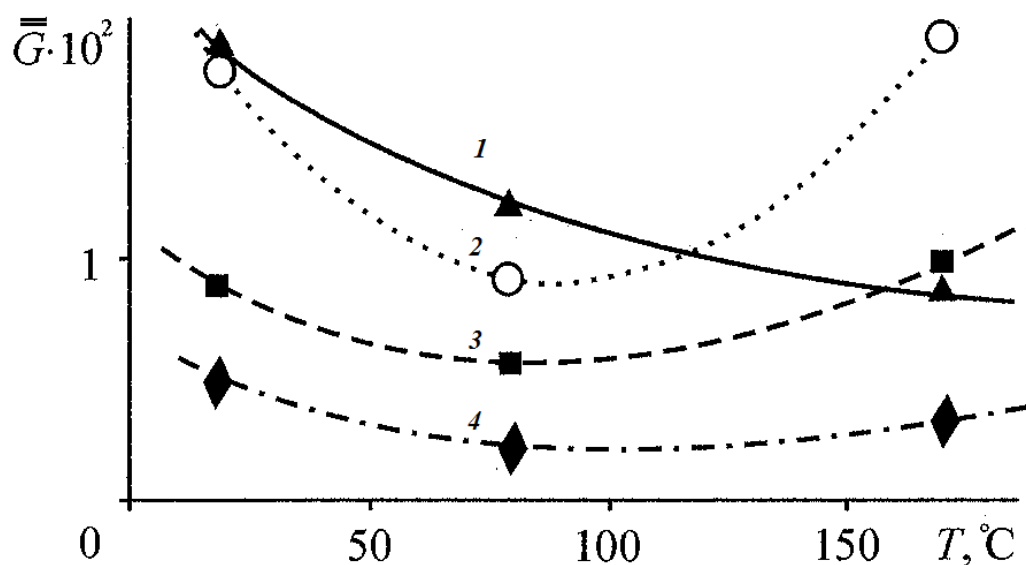
Значения коэффициентов и степеней, используемые в данной формуле, приведены в таблице 4.1 для расчёта величины эрозионного разрушения некоторых материалов.

Таблица 4.1

Наименование материала	Значения коэффициентов и степеней в уравнении (4.19)					
	k_1	k_2	a	b	c	d
Графит	28,0	0	2,00	0,2	0	1,25
Углерод-углерод	10,1	$9,25 \cdot 10^{-4}$	1,82	0,2	0,33	1,25

Экспериментальные исследования взаимодействия теплозащитных материалов (ТЗМ) с высокоскоростными гетерогенными потоками, как правило, проводятся на высоко - и низкотемпературных газодинамических стендах.

На рисунке 4.4 приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры преграды из композиционных ТЗМ на их эрозионное разрушение [23]. Экспериментальные исследования проводились в аэродинамических трубах. При этом диаметр частиц составлял $d_p \approx 50$ мкм. На таких стендах скорость частиц изменялась в широком диапазоне, $V_p = 170 \div 2300$ м/сек. Кроме того, исследуемая модель преграды до соударения с частицами нагревались газодинамическим методом до температур $T_w = 350 \div 473$ К.



«К-фаза»: Al_2O_3 , $\alpha=90^\circ$, $d_p=50\text{мкм}$, $V_p=170\text{м/с}$. 1 – АТ-1В, 2 – СТКТ-П,
3 – ТТПС-15, 4 – ТП-41

Рисунок 4.4 Влияние температуры на интенсивность эрозионного разрушения разных композиционных ТЗМ в струе гетерогенного потока

Из анализа представленных на рисунке 4.4 данных следует, что, практически, все исследованные композиционные материалы имеют минимальные значения эрозии при определённых уровнях их температуры в момент взаимодействия с гетерогенным потоком. Установленный факт можно объяснить переходом связующего композиционных теплозащитных материалов в аморфное состояние при нагреве.

Следует отметить, что предельный нагрев в эксперименте композиционных теплозащитных материалов до температуры $T_{w \max} = 473\text{K}$ обусловлен свойством связующего ТЗМ (органические смолы), которое, как известно, при температурах $473 \div 512\text{K}$ подвергается термодеструкции.

Кроме того, одним из серьёзных недостатков стенда, на котором проводились испытания ТЗМ, являлось наличие предварительного нагрева испытуемых образцов. При такой постановке эксперимента по толщине исследуемого образца ТЗМ реализовались малые значения градиентов температуры. Это не соответствовало реальным условиям полёта

высокоскоростных ЛА, в которых в передней критической точке величина градиента температур может достигать $10^3 \div 10^5$ град/мм.

Все вышеперечисленные факторы ограничивают применимость результатов данного исследования и показывают всю сложность моделирования реальных условий, которым подвергаются композиционные ТЗМ, на экспериментальных стендах.

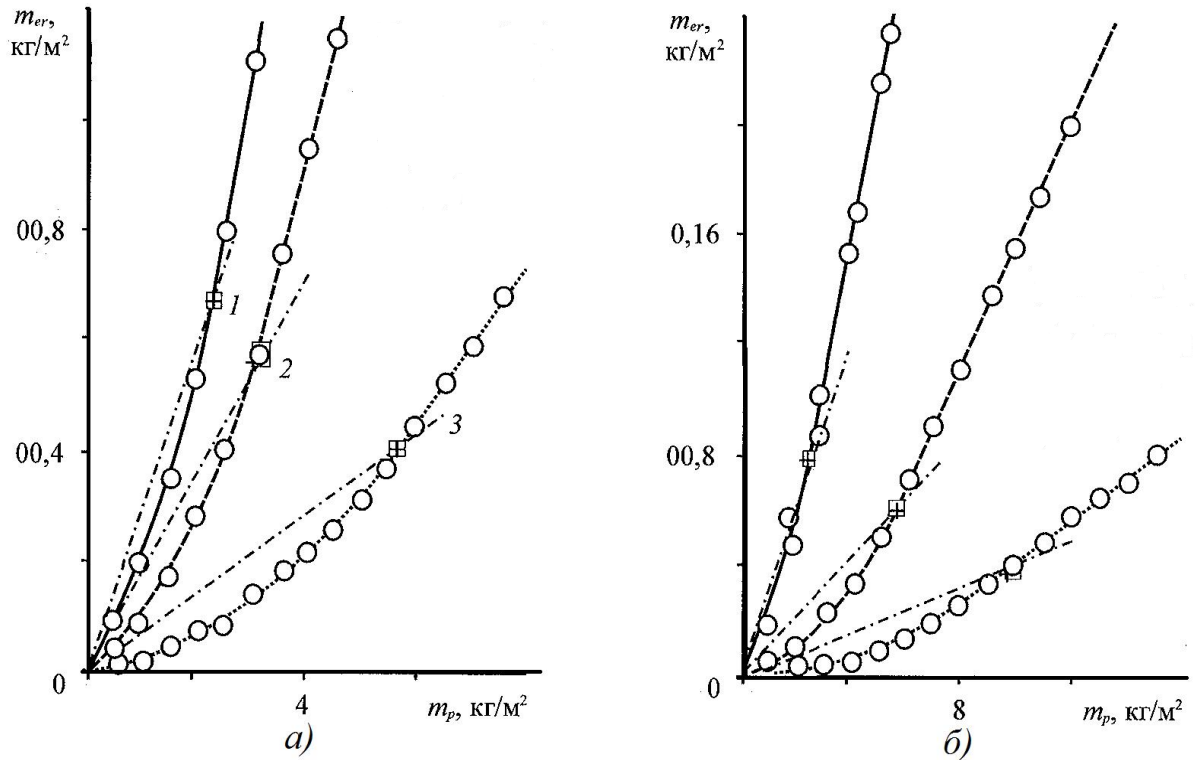
4.4. Некоторые режимы эрозионного разрушения конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком

Процесс эрозионного разрушения является многопараметрическим, то есть сложным. При этом сложный процесс эрозионного разрушения конструкционных материалов состоит из множества более простых физико-химических процессов. В этой совокупности простых процессов для каждого из них появляются границы, обусловленные достижением определенных значений параметров (пороговые значения), за пределами которых можно с определённой погрешностью пренебречь данным процессом.

Анализ множества экспериментальных данных, полученных в результате экспериментальных исследований процесса эрозионного разрушения, показал, что такие пороговые значения могут иметь следующие параметры:

- удельная масса частиц гетерогенного потока – m_p^* , кг/м²;
- скорость соударения частиц с поверхностью – V_p^* , м/сек;
- температура поверхности исследуемого материала – T_w^* , К.

На рисунке 4.5 представлены экспериментальные данные эрозионного разрушения материалов при их взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком [4]. Из анализа представленных результатов видно, что зависимость эрозионного разрушения m_{er} от интенсивности падающих частиц m_p на начальном этапе не является линейной функцией, но при увеличении интенсивности падающих частиц функция становится линейной.



а) «К-фаза»: WC, $d_p = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 1 – $V_p = 480 \text{ м/с}$, 2 – $V_p = 420 \text{ м/с}$, 3 – $V_p = 300 \text{ м/с}$;

б) «К-фаза»: WC, $d_p = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 1 – $V_p = 435 \text{ м/с}$, 2 – $V_p = 300 \text{ м/с}$, 3 – $V_p = 220 \text{ м/с}$;

Рисунок 4.5. Зависимость эрозионного разрушения m_{er} материала D-16 от интенсивности падающих частиц m_p карбида вольфрама

В результате обобщения представленных на рисунке 4.5 экспериментальных данных предложена общая схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов). Эта схема базируется на зависимости интенсивности эрозионного разрушения металлов m_{er} от интенсивности воздействия на поверхность металлического образца удельной массы падающих частиц m_p (рисунок 4.6).

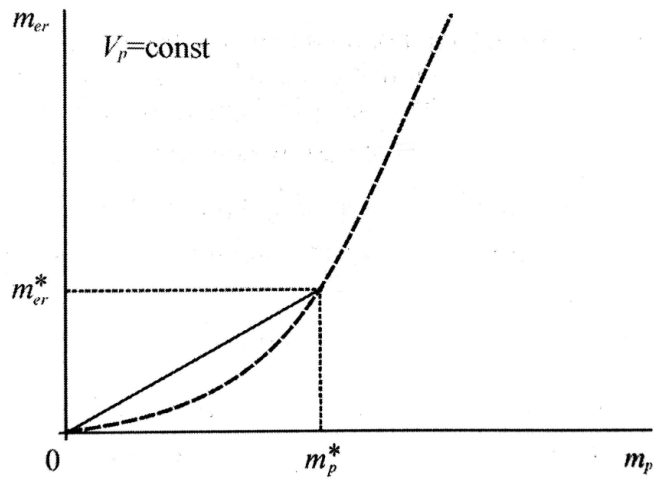


Рисунок 4.6. Общая схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов), при воздействии частицами с постоянной скоростью

Из представленных на рисунке 4.6 данных следует, что общий механизм эрозионного разрушения материалов (металлов) можно разделить на 2 стадии. Для анализа каждой из стадий воспользуемся безразмерным параметром (критерием) в виде $\bar{G} = dm_{er} / dm_p$. Изменение этого параметра от m_p представлено на рисунке 4.7.

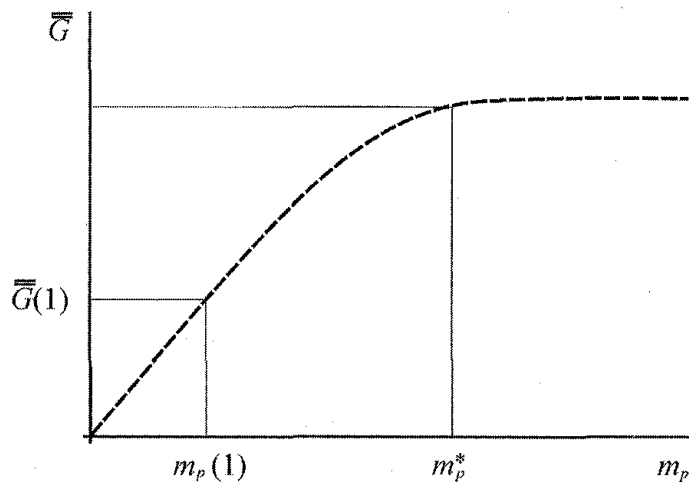


Рисунок 4.7. Качественная зависимость безразмерной скорости \bar{G} эрозионного разрушения материалов (металлов) от интенсивности воздействия на поверхность удельной массы m_p частиц набегающего гетерогенного потока

Из представленной схемы общего механизма эрозионного разрушения материалов (металлов), следует:

- на первой стадии разрушения материалов безразмерная скорость эрозионного разрушения \bar{G} нелинейно возрастает с увеличением интенсивности воздействия частиц гетерогенного потока m_p , ($кг/м^2$). Это обусловлено предысторией развития механизма воздействия гетерогенного потока на материал. На данной стадии поверхность материалов претерпевает ряд физических превращений, таких как: образование микротрещин, каверн, как следствия локальной эрозии поверхностного слоя. На этой же стадии устанавливается температура поверхности материалов и температурное поле в их объёме. На реализацию данной стадии разрушения затрачивается некоторое время, которое будем называть временем реализации нестационарного механизма разрушения материалов;

- по завершении первой стадии развивается вторая стадия эрозионного разрушения. На этом режиме разрушения $\bar{G} = const$, ($\bar{G} = dm_{er} / dm_p \approx m_{er} / m_p = const$), то есть наступает стационарная стадия механизма эрозионного разрушения материалов.

Значение удельной массы частиц m_p^* , воздействующих на $1 м^2$ поверхности материала, при которой безразмерная скорость \bar{G} эрозионного разрушения материалов становится постоянной, в дальнейшем будем называть пороговым.

В результате, по аналогии, можно определить значение скорости соударения частиц V_p^* с поверхностью преграды, как пороговое. Данное значение скорости частиц характеризуется установлением постоянства эрозионного разрушения преграды [69, 70].

Определим величину скорости воздействия частиц, при которой на поверхности преграды начинается эрозионное разрушение, как некую критическую скорость V_{cr} , характерную для каждого рода конструкционного материала [70]. Соотношение для расчёта этой скорости получено в виде:

$$V_{cr} = 0.2 \sqrt{I_{er} \frac{\rho_{np}}{\rho_p}}, \quad (4.22)$$

где ρ_m и ρ_p – плотности материалов преграды и частиц соответственно, I_{er} – энтальпия эрозии материала.

В работе [2], применяя аналогию теплового и эрозионного разрушения, получено выражение для безразмерной скорости эрозионного разрушения в виде:

$$\bar{G} = \eta \cdot \frac{V_p^2}{2I_{er}}, \quad (4.23)$$

где η — коэффициент, характеризующий долю кинетической энергии частицы, перешедшей в энергию разрушения материала преграды.

Естественно, что коэффициент η зависит от скорости соударения частиц о преграду. На рисунке 4.8 представлен вид данной зависимости [61], которая аппроксимируется в виде следующего соотношения:

$$\eta = 1 - \exp\left[-\frac{V_{cr} - V_p}{0.5V_{cr}}\right], V_p > V_{cr}, \quad (4.24)$$

Проведём дальнейший анализ. Для этого выделим на рисунке 4.8 два характерных значения коэффициента η : $\eta_1 = 0,1$ и $\eta_2 = 0,9$.

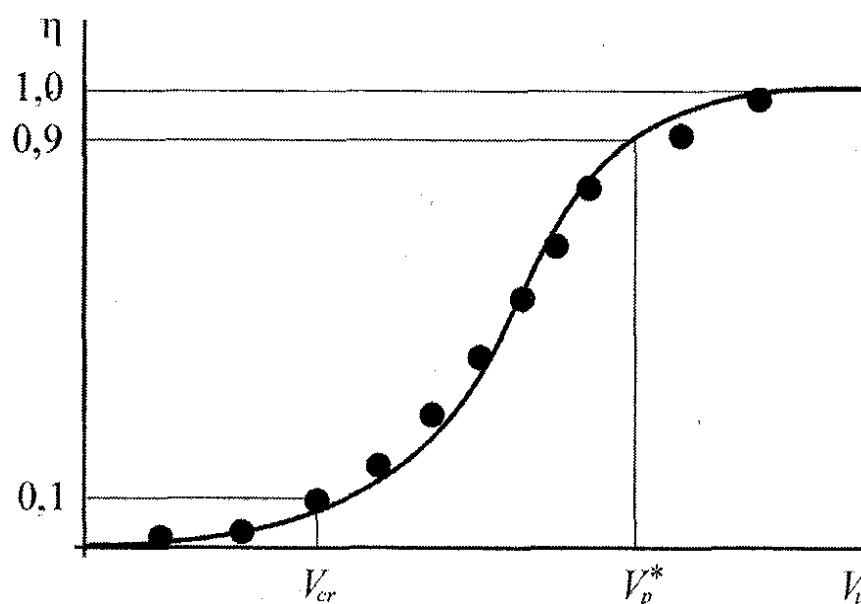


Рисунок 4.8. Изменения параметра η в зависимости от скорости соударения

В первом случае значение η_1 указывает на тот факт, что только 10% кинетической энергии частицы затрачено на разрушение материала преграды. Это означает, что с погрешностью 10% можно считать, что преграда не разрушается, то есть коэффициент $\eta_1 = 0,1$ можно принять в качестве характерного значения.

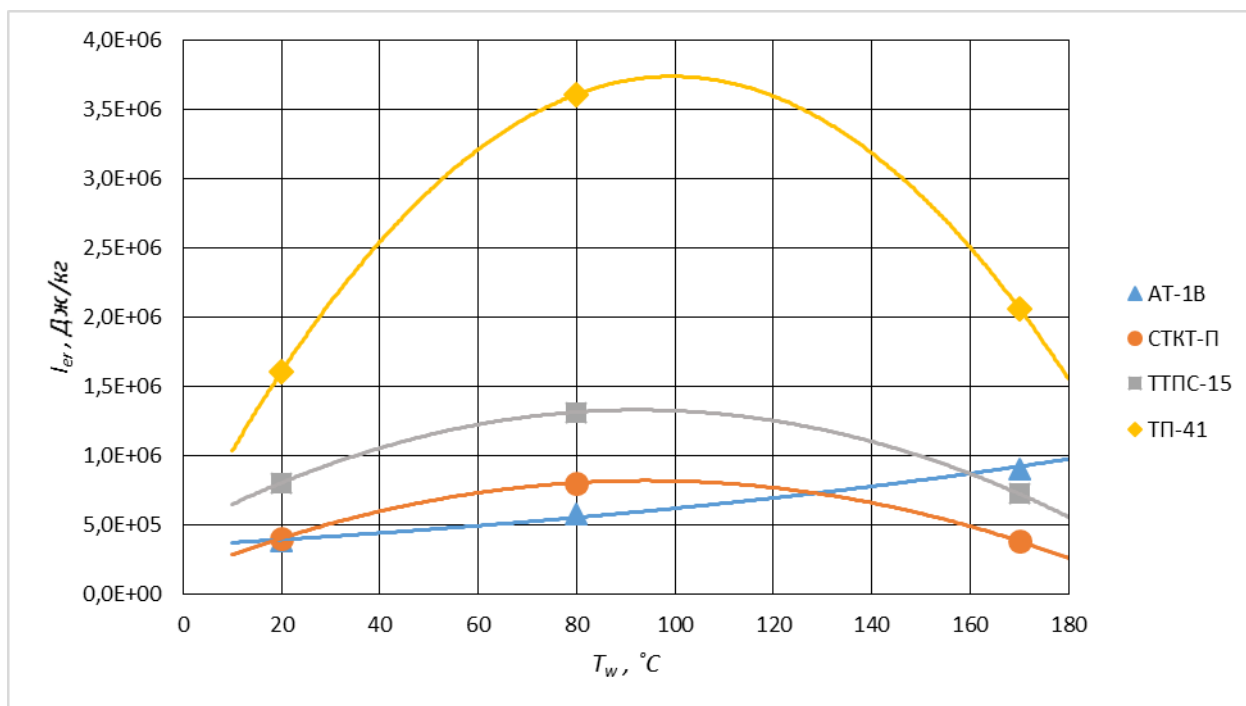
Во втором случае при значении $\eta_2 = 0,9$, то есть при затратах 90% кинетической энергии частицы, эрозионное разрушение материала выходит на стационарный уровень с погрешностью до 10%. Поэтому значение коэффициента $\eta_2 = 0,9$ можно принять в качестве характерного значения.

В результате анализа экспериментальных данных ряда работ [2], получено соотношение для определения величины порогового значения скорости частиц для преград из однородных материалов (металлов). Установлено, что с погрешностью до 10% пороговое значение скорости частиц соответствует: $V_p^* \approx 2V_{cr}$.

Как отмечалось ранее, скорость эрозионного разрушения большинства металлов до определенной температуры T_w^* практически не изменяется, а в некоторых случаях даже падает (рисунок 4.3). Данное значение температуры будем называть также пороговым. В работе с погрешностью до 10% значение этой температуры определено соотношением: $T_w^* \approx 0,5T_{пл}$.

Используя соотношение (4.23), полученное в результате проведенного выше анализа, а также экспериментальные данные, представленные на рисунке 4.4, определим изменение I_{er} как функции T_w для некоторых конструкционных материалов теплозащитного назначения.

Результаты изменения $I_{er} = f(T_w)$ представлены на рисунке 4.9.



«К-фаза»: Al_2O_3 , $\alpha=90^\circ$, $d_p=50\text{мкм}$, $V_p=170\text{м/с}$

Рисунок 4.9. Влияние температуры на энтальпию эрозионного разрушения разных композиционных ТЗМ

4.4.1. Однопараметрическая модель эрозионного разрушения

Единственным параметром однопараметрической модели эрозионного разрушения является эффективная энтальпия эрозионного разрушения I_{er} . Она практически не зависит от скорости соударения частиц о преграду, а также от размеров и формы частиц. В этой связи, однопараметрическая модель эрозионного разрушения материалов при воздействии высокоскоростных гетерогенных потоков имеет границы применимости, в рамках которых она с достаточной точностью согласуется с экспериментальными данными. В результате анализа экспериментальных данных ряда работ указанные границы определены следующим образом:

- скоростью соударения частиц в момент удара о поверхность V_p должна быть больше пороговое значение скорости частиц V_p^* ($V_p > V_p^*$). Это означает, что однопараметрическая модель эрозионного разрушения материалов применима только в том случае, когда $\eta \rightarrow 1$;

- температура поверхности материала T_w в момент воздействия гетерогенного потока должна быть меньше порогового значения температуры T_w^* .

В целях дальнейшего анализа применимости данной модели рассмотрим два случая:

- для установившегося режима эрозионного разрушения, наступающий при $m_p > m_p^*$, кг/м²;
- для неустойчивого режима эрозионного разрушения, когда $m_p < m_p^*$, кг/м².

Как показано ранее, интенсивность установившегося режима эрозионного разрушения определяется скоростью соударения частиц с преградой V_p и родом материала. В таком случае безразмерная интенсивность эрозионного разрушения, как показано в работе [2], может быть определена в виде следующего соотношения:

$$\bar{G} = \frac{m_{er}}{m_p} = \frac{V_p^2}{2I_{er}}. \quad (4.25)$$

Предпринималось множество попыток для установления взаимосвязи эффективной энтальпии эрозионного разрушения I_{er} с различными параметрами, характерными как для определенного класса материалов, так и являющимися общими для многих материалов.

Например, для металлов удалось выразить энтальпию эрозионного разрушения I_{er} через их микротвёрдость H_B . В результате, получено выражение, которое с некоторой погрешностью справедливо только для чистых и не подвергавшихся специальной обработке металлов. Такое соотношение имеет вид:

$$I_{er} \approx 2.5 \cdot 10^5 \frac{H_B}{\rho_m}. \quad (4.26)$$

При неустойчивом режиме разрушения безразмерная интенсивность эрозионного разрушения \bar{G} наряду с эффективной энтальпией эрозионного разрушения I_{er} переменны даже при постоянном значении скорости соударения

частиц с преградой V_p . Границы данного режима определяет величина удельной массы выпавших частиц ($\text{кг}/\text{м}^2$). Такой режим реализуется при $m_p < m_p^*$.

В работе [44] показано, что для $m_{er}(m_p)$ и $G(m_p)$ необходимую точность дают следующие аппроксимирующие зависимости в безразмерном виде:

$$\frac{m_{er}}{m_{er}^*} = \left(\frac{m_p}{m_p^*} \right)^2; \quad (4.27)$$

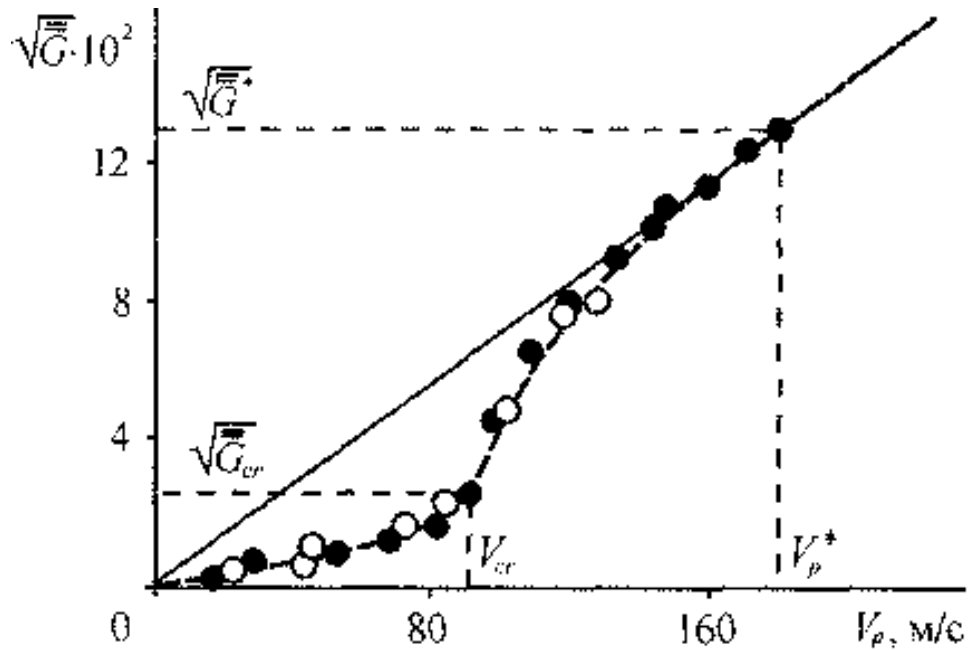
$$\frac{\bar{G}}{\bar{G} m_p^*} = \frac{m_p}{m_p^*}. \quad (4.28)$$

4.4.2. Двухпараметрическая модель эрозионного разрушения

Появление двухпараметрической модели эрозионного разрушения объясняется возможностью пренебрежения термосиловым воздействием окружающей среды при скоростях соударения частиц о поверхность преграды $V_p < 1000 \text{ м/с}$.

Главной отличительной чертой двухпараметрической модели от однопараметрической является наличие поправки, которая снижает скорость уноса массы при скоростях соударения частиц о поверхность, меньших порогового значения ($V_p < V_p^*$).

Кривая, характеризующая зависимость безразмерной скорости уноса массы $\bar{G} = \frac{dm_{er}}{dm_p}$ от скорости соударения частиц V_p для алюминиевой преграды, бомбардируемой сферическими частицами, представлена на рисунке 4.10.



$$d_p = 1,58 \text{ мм и плотностью } \rho_p = 14500 \text{ кг/м}^3$$

Рисунок 4.10. Зависимость безразмерной скорости уноса массы алюминиевой преграды от скорости соударения с частицами размером

Из анализа представленной кривой следует, что по изменению ее наклона можно выделить три участка, на каждом из которых реализуется установившейся процесс эрозионного разрушения:

1. В диапазоне $0 < V_p < V_{cr}$ – безразмерная скорость уноса массы пропорциональна квадрату скорости, но величина её мала, не более 10^{-3} .
2. В диапазоне $V_{cr} < V_p < V_p^*$ – зависимость безразмерной скорости уноса массы \bar{G} от скорости соударения V_p интенсивно возрастает, при этом анализируемая зависимость близка к квадратичной параболе.

С учётом того, что в диапазоне $0 < V_p < V_{cr}$ безразмерная скорость уноса массы мала, получена аппроксимирующая зависимость $\bar{G} = f V_p$ для случая, когда скорость соударения частиц с преградой $V_p > V_{cr}$ [44]:

$$\bar{G} = \frac{\eta V_p^2}{2I_{er}} = \left[1 - \exp\left(\frac{V_{cr} - V_p}{0.5V_{cr}}\right) \right] \frac{V_p^2}{2I_{er}}. \quad (4.29)$$

Выводы по главе 4

По результатам исследований, проведённых в данной главе работы можно сделать следующие выводы:

- приведён анализ физической модели процессов взаимодействия высокоскоростных гетерогенных потоков с поверхностью преграды. Получены соотношения для расчёта ряда параметров, реализуемых в процессе взаимодействия;

- рекомендовано эмпирическое соотношение (4.21) для расчёта безразмерной скорости эрозионного уноса массы графита и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ);

- проведен критический анализ механизма эрозии нагретых конструкционных материалов при взаимодействии с гетерогенным потоком. В результате установлено наличие для каждого рода конструкционных материалов некоего порогового значения скорости частиц и температуры, при достижении которых реализуется резкое увеличение интенсивности их эрозионного разрушения. В частности, с погрешностью до 10% рекомендованы соотношения для оценки пороговых значений скорости частиц и температуры поверхности;

- по результатам экспериментальных исследований с использованием полученного соотношения (4.23) рассчитаны зависимости эффективной энтальпии эрозионного разрушения, как функции температуры поверхности для некоторых теплозащитных материалов.

- предложена схема развития физического механизма эрозионного разрушения материалов (металлов), при воздействии частицами с постоянной скоростью. Установлены одно- и двухпараметрические модели эрозионного разрушения материалов. Выявлены диапазоны изменения параметров гетерогенного потока, при которых реализуются указанные модели.

5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ПОТОКА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

К сожалению, библиография по данной тематике весьма скудная. Наш поиск по особенностям взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата (ЛА) не увенчался успехом. Некоторые моменты по данной тематике отражены в книгах [2, 44, 61, 70]. В связи с этим, в данной главе приведен анализ особенностей механизмов взаимодействия неизотермического гетерогенного потока с поверхностью высокоскоростного летательного аппарата с использованием в основном экспериментальных данных.

При взаимодействии высокоскоростного летательного аппарата с неизотермическим гетерогенным потоком, поверхность планера и другие элементы конструкции подвергается термоэрозионному разрушению, которое является комплексным процессом, включающим термохимический, газодинамический (механический) и эрозионный унос массы. В результате, удельная суммарная скорость уноса массы (G_{Σ} , кг/м²·с) конструкционных и теплозащитных материалов (ТЗМ) при воздействии высокоскоростного гетерогенного потока складывается из трёх составляющих:

$$G_{\Sigma} = G_T + G_M + G_{er}, \quad (5.1)$$

где G_T – удельная скорость уноса массы, обусловленная термохимическим разрушением при воздействии на ТЗМ высокотемпературного газа-носителя; G_M – удельная скорость уноса массы, обусловленная газодинамическим разрушением (аэродинамическим поверхностным трением); G_{er} – удельная скорость уноса массы, обусловленная эрозионным разрушением вследствие воздействия «К-фазы» набегающего высокоскоростного гетерогенного потока.

5.1. Анализ особенностей термохимического и эрозионного разрушения конструкционных материалов при взаимодействии с высокоскоростным и высокотемпературным гетерогенным потоком

Термохимическое разрушение, как правило, сопутствует интенсивному аэродинамическому нагреву тепловой защиты высокоскоростных летательных аппаратов. За многие десятилетия огневых испытаний ТЗМ механизмы их термохимического разрушения, несмотря на их сложность, достаточно глубоко изучены. Разработаны и верифицированы математические модели механизмов [21, 47, 57, 74]. Показана высокая их достоверность при решении задач аэродинамического нагрева.

В отличие от указанного, исследование механизма эрозионного разрушения материалов, их эрозионной стойкости при взаимодействии с высокоскоростным гетерогенным потоком, проведено всё ещё недостаточно и требует более глубокого изучения. Некоторые результаты таких исследований и их анализ изложены в данной работе.

Концепция исследования эрозионной стойкости теплозащитных материалов и некоторых конструкционных материалов в составе планера высокоскоростного ЛА, строилась с использованием метода дифференцирования суммарного уноса массы материалов на отдельные составляющие: эрозионную, газодинамическую и термохимическую (5.1). Экспериментальными исследованиями установлено, что для большинства материалов, особенно металлов, газодинамическая составляющая скорости уноса массы мала, то есть $G_M \approx 0$. Данный факт обусловлен тем, что напорное давление и газодинамическое трение на поверхности исследуемого образца не велики. В таком случае, (5.1) упрощается к виду:

$$G_{\Sigma} = G_{er} + G_{гомог} , \quad (5.2)$$

где $G_{гомог} = G_T$.

Следуя указанной выше концепции, в работе задача исследования термоэрозионной стойкости материалов в высокотемпературных и высокоскоростных гетерогенных потоках заключалась в следующем. Как показано

ранее, полученная экспериментально суммарная удельная скорость уноса массы (G_{Σ}) термоэрозионного разрушения материала согласно (5.2) включает две составляющие: тепловую ($G_{\text{гомоз}}$) и эрозионную ($G_{\text{ер}}$). При этом в эксперименте $G_{\text{гомоз}}$ и G_{Σ} определялись, как функции температуры поверхности.

Алгоритм экспериментального определения $G_{\text{гомоз}}(T_w)$ и $G_{\Sigma}(T_w)$ представлен в последующих разделах работы.

По итогам полученных экспериментальных данных, с учётом (5.2) указанная выше постановка задачи сводилась к определению удельного эрозионного уноса массы материала в виде:

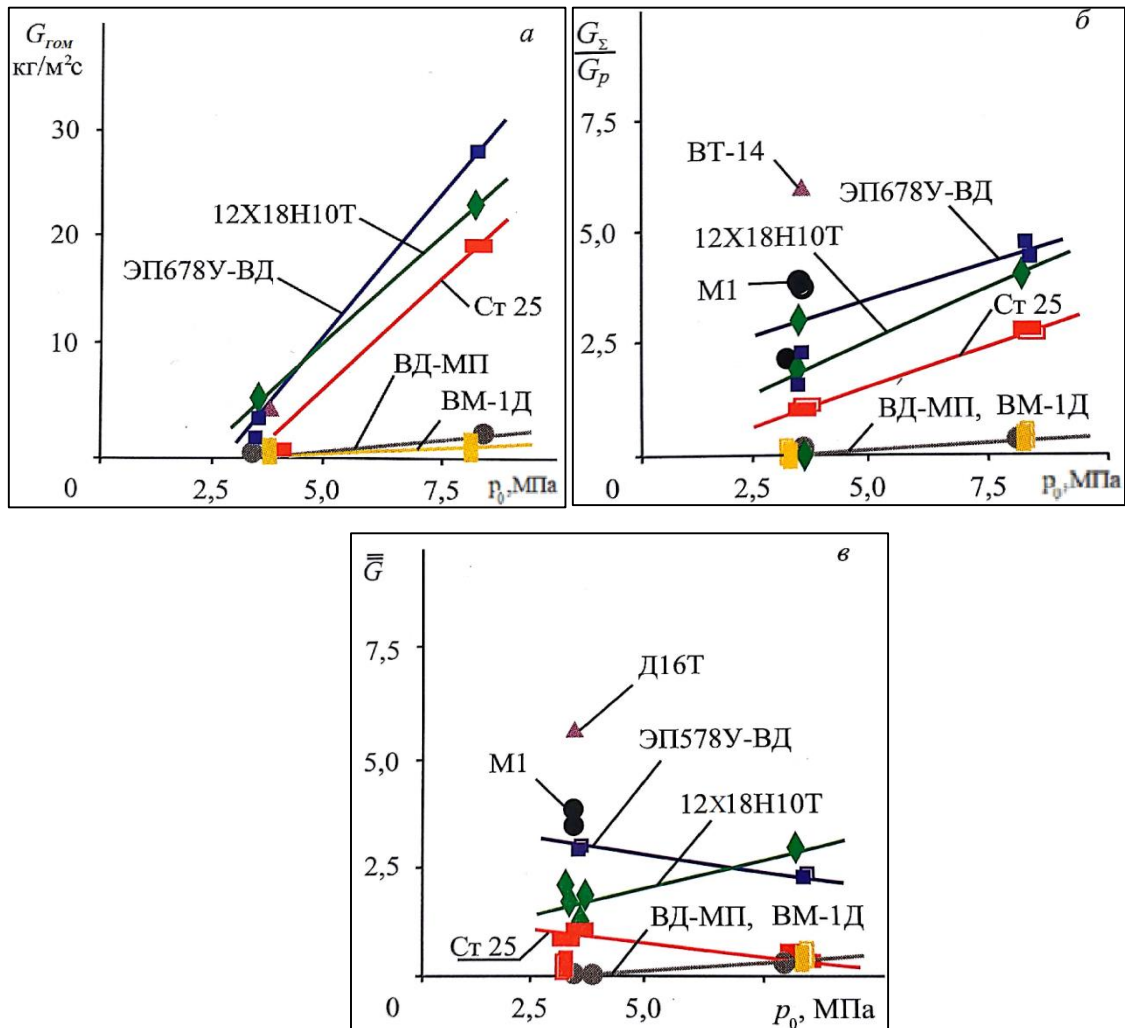
$$G_{\text{ер}} = G_{\Sigma} - G_{\text{гомоз}}. \quad (5.3)$$

Результаты комплексных термоэрозионных испытаний на стенде образцов некоторых металлов и композиционного ТЗМ (стеклопластика) на двух режимах с (давления торможения $P_0 \approx 3,5$ и $8,5$ МПа) при температуре торможения гомогенного и гетерогенного потоков $T_0 \approx 2300$ К представлены на рисунке 5.1 [2].

5.1.1. Особенности теплоэрозионного разрушения металлов

Попытка провести испытания на указанных режимах образцов алюминиевого сплава АМГ-6 не увенчалась успехом. Исследуемые образцы не выдержали интенсивной тепловой и газодинамической нагрузки и начали разрушаться даже в гомогенном потоке на режиме №1 при давлении торможения $P_0 \approx 3,5$ МПа. Образцы из меди М-3 и титанового сплава ВТ-14 выдержали условия термоэрозионного воздействия также только на первом режиме. Анализ полученных результатов выявил сильную зависимость удельной массовой скорости разрушения металлов от давления торможения как в гомогенном $G_{\text{гомоз}}$, так и гетерогенном G_{Σ} потоках (рисунок 5.1а и 5.1б). При этом с увеличением давления торможения от $P_0 \approx 3,5$ МПа до $P_0 \approx 8,5$ МПа удельные массовые

скорости разрушения указанных выше металлов и сплавов сильно (более чем в 2 раза) возрастают¹.



$V_{\text{гом}} = V_p = 1300 \text{ м/с}$, частицы Al_2O_3 , $d_p = 50 \text{ мкм}$, $\bar{G} = G_{\text{er}} / G_p$ - безразмерная скорость гетерогенного разрушения материалов в стационарном режиме, G_p - удельная скорость массы падающих частиц в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$, а - изменение удельной скорости уноса массы металлов при взаимодействии с высокоскоростным, высокотемпературным гомогенным потоком; б - изменение безразмерной скорости уноса массы металлов при взаимодействии с высокоскоростным, высокотемпературным гетерогенным потоком; в - безразмерная скорость эрозионного разрушения металлов

Рисунок 5.1. Зависимости удельных скоростей разрушения разных конструкционных металлов от давления торможения при взаимодействии с высокотемпературными гомогенными и гетерогенными потоками

¹ Экспериментальные данные, представленные на рисунке 5.1, получены при $T_w < T_{\text{плавл}}$.

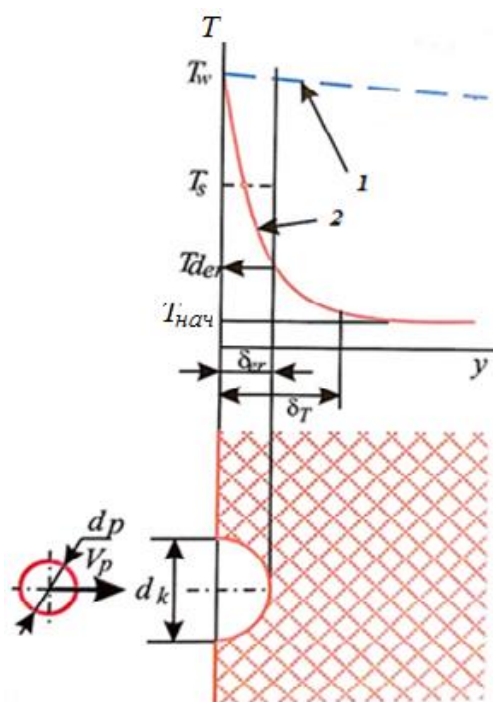
Исключение составляют металлы-композиты типа ВД-МП и ВМ-1Д, обладающие высокой физической плотностью и вязкостью в связи с наличием в их структуре вольфрама, меди и ванадия. Определённая по результатам эксперимента с использованием соотношения (5.3) чисто эрозионная составляющая безразмерной скорости разрушения металлов в виде $\bar{G} = G_{er}/G_p = f(P_0)$, показала менее интенсивную зависимость от давления торможения (рисунок 5.1с). Это обусловлено тем, что в эксперименте G_p имело значительную величину.

Кроме того, экспериментально установлено, что сплавы металлов типа ЭП578У-ВД, ВД-МП и ВМ-1Д проявили даже тенденцию к уменьшению \bar{G} от давления торможения, $\bar{G} = f(P_0)$. Это объясняется тем, что указанные сплавы в своём составе содержали значительное количество вязкой меди, температура плавления которой составляет $T_{пл} = 1356K$. В этой связи, при достижении в ходе эксперимента температуры поверхности образца равной $T_w \approx 900-1000K$ медь становится ещё более вязкой, что снижает уровень эрозионного разрушения при взаимодействии с гетерогенным потоком. Это явилось причиной снижения величины безразмерной скорости эрозионного разрушения указанных сплавов. Указанный эффект наблюдался в экспериментах не только для сплавов, содержащих вязкие компоненты типа меди, но и для легированных сталей, температура поверхности в которых в ходе эксперимента достигала уровня температуры плавления.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил выявить некоторые особенности механизма термохимического и эрозионного разрушения металлов при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками.

Как известно, металлам и их сплавам характерны такие свойства, как высокая теплопроводность и эрозионная стойкость. Для данного рода материалов характерна взаимосвязь их тепловой и эрозионной составляющей. При термоэрозионном разрушении таких материалов скорость распространения температурной волны в их объёме за время релаксации удара за счёт высокой

температуропроводности больше скорости линейного уноса обусловленного эрозией в результате соударения высокоскоростной «К-фазы» с поверхностью материала. В результате $\delta_{er} \ll \delta_T$. Это условно представлено на рисунке 5.2. Кроме того, благодаря высокой эрозионной стойкости металлов глубина образовавшегося кратера в результате единичного удара частицы незначительная, то есть δ_{er} мала. Если же на поверхность исследуемого образца воздействует гетерогенный поток с высоким удельным расходом высокоскоростной «К-фазы», то на всей поверхности образца реализуется интенсивная механическая эрозия. При этом, как показал эксперимент, интенсивность эрозии металлов резко возрастает с увеличением удельных расходов потока падающей массы частиц.



1 – температурное поле по толщине металлической пластины, 2 – температурное поле по толщине стеклопластика, d_k – диаметр кратера, δ_{er} – глубина кратера, δ_T – глубина прогретого слоя, $T_{нач}$ – начальная температура материала преграды, $T_{дер}$ – температура на глубине кратера, T_s – среднеинтегральная температура по глубине кратера δ_{er}

Рисунок 5.2. К пояснению процесса взаимодействия частиц высокоскоростного и высокотемпературного гетерогенного потока с поверхностью разного рода материалов

Таким образом, механизм разрушения металлов в указанных условиях воздействия определяется, главным образом, механической эрозией материала. Эта эрозия обусловлена ударами частиц о поверхность и их кинетической энергией в момент удара. Однако если температура поверхности металла достигает уровня температуры плавления, то эрозионное разрушение материала дополняется ещё и уносом массы расплавленного металла. Как правило, такой механизм разрушения не приемлем в условиях полёта высокоскоростных ЛА.

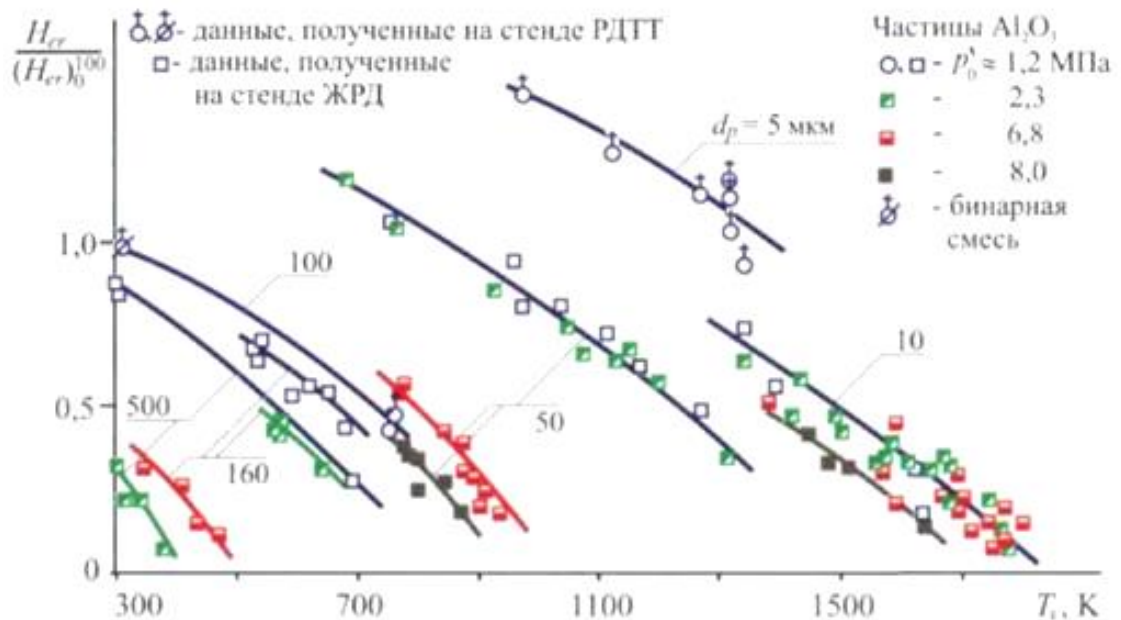
Упростим сложный процесс термоэрозионного разрушения материалов при воздействии высокотемпературного и высокоскоростного гетерогенного потока, допустив следующее приближение. Будем считать, что скорость уноса массы при совместном термоэрозионном воздействии гетерогенного потока реализуется в результате действия двух независимых процессов: теплового и эрозионного (механического удара частиц). В таком случае, в работе [71] скорость уноса массы при совместном термоэрозионном воздействии гетерогенного потока представлена в виде:

$$G_{\Sigma} = \frac{\left(\frac{\alpha}{C_p}\right)_{\Sigma} \cdot (I_e - I_w) - \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4}{I_{эф}} + G_p \cdot \frac{V_p^2}{2H_{er}},$$

(5.4)

где первое слагаемое представляет $G_{гомог}$ (термохимическое разрушение; чисто газовый поток), второе – G_{er} (механическое, эрозионное разрушение вследствие удара частиц; гетерогенный поток). Кроме того, по аналогии с химически активным гомогенным пограничным слоем имеем: $\left(\frac{\alpha}{C_p}\right)_{\Sigma}$ - параметр теплообмена с учётом влияния на теплообмен частиц в потоке, I_e – энтальпия восстановления; I_w – энтальпия газа-носителя при температуре поверхности образца; G_p – удельный расход потока массы падающих на поверхность образца частиц; V_p – скорость частиц в момент удара о поверхность образца; $I_{эф}$ – эффективная энтальпия термохимического разрушения материала в гомогенном потоке; H_{er} – эффективная энтальпия эрозионного разрушения материала в гетерогенном потоке.

Эффективная энтальпия эрозионного разрушения материалов в гетерогенном потоке определяется экспериментально для каждого конструкционного материала. Значение H_{er} полученные экспериментально для конструкционных материалов представлены на рисунке 5.3



$(H_{er})_0^{100}$ - эффективная энтальпия материала для частиц диаметром, $d_p \approx 100$ мкм при давлении торможения $P_0 \approx 1,2$ МПа и среднеинтегральной температуре $T_s \approx 300$ К

Рисунок 5.3. Зависимость эффективной энтальпии разрушения стеклопластика H_{er} от среднеинтегральной температуры прогрева поверхностного слоя образца T_s для разной дисперсности «К-фазы» и давления торможения P_0 набегающего гетерогенного потока

Как следует из соотношения (5.4), при расчёте суммарной удельной скорости уноса массы материала G_{Σ} необходимо знать температуру поверхности T_w стенки в процессе разрушения. В таком случае T_w должна либо определяться в эксперименте, либо оцениваться из баланса энергии на разрушающейся поверхности при квазистационарном режиме. Такое уравнение баланса для металлических конструкционных материалов имеет вид:

$$\left(\frac{\alpha}{C_P}\right)_{\Sigma} \cdot (I_e - I_w) + \alpha_{\kappa} \cdot G_P \cdot \frac{V_P^2}{2} = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 + G_{\Sigma}(T_w) \cdot c_{\text{матер}} \cdot (T_w - T_{\text{нач}}), \quad (5.5)$$

где α_{κ} – коэффициент аккомодации энергии частицы при ударе (рисунок 5.4),
 $c_{\text{матер}}$ – теплоёмкость исследуемого материала.

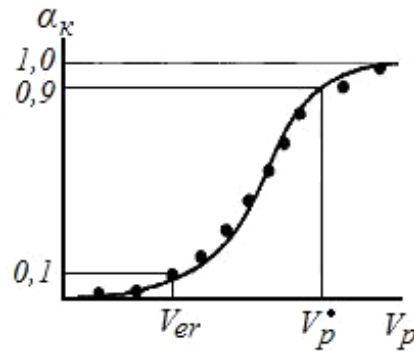


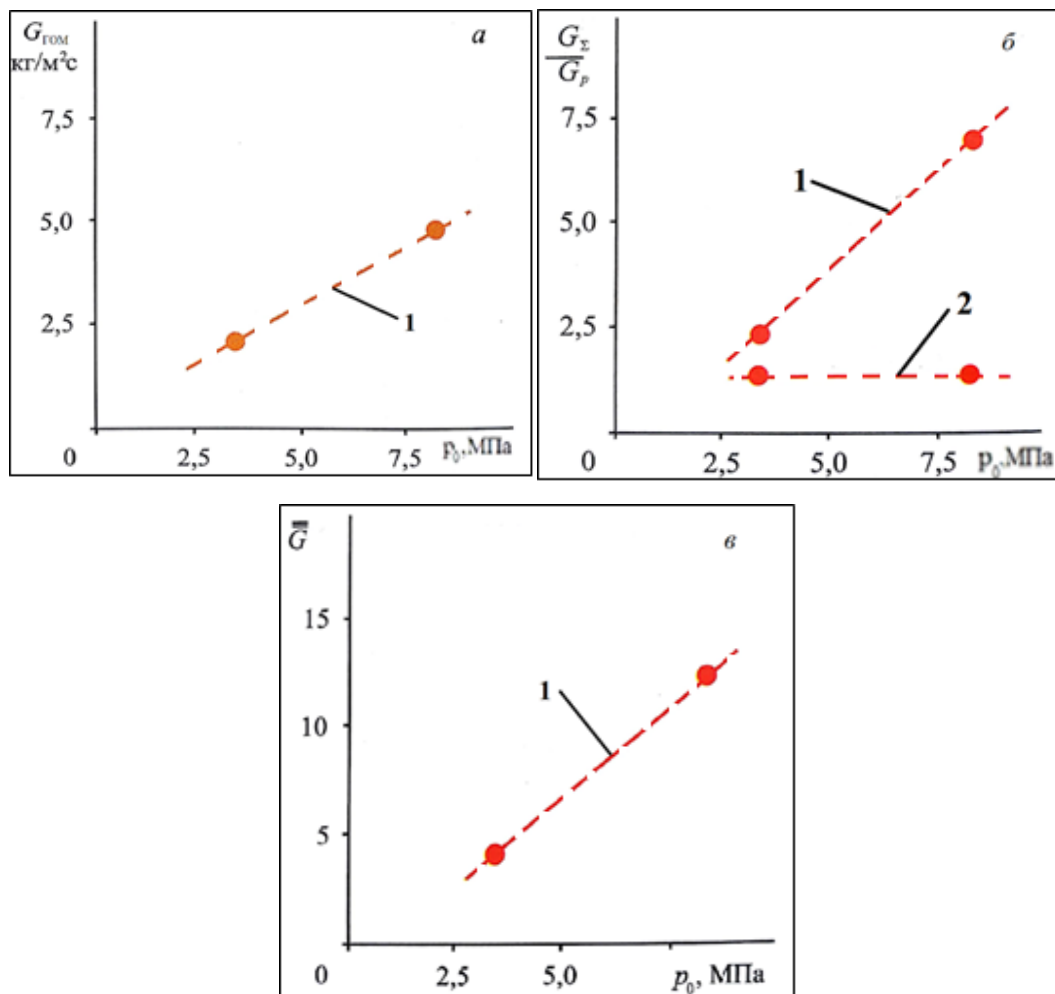
Рисунок 5.4. Качественная зависимость коэффициента аккомодации α_{κ} энергии частицы от скорости при ударе о поверхность образца

Таким образом, проведенный анализ особенностей теплоэрозионного разрушения металлов и сплавов в высокоскоростных и высокотемпературных гетерогенных потоках позволит рекомендовать алгоритм расчёта суммарной скорости уноса массы при термоэрозионном воздействии гетерогенного потока, представленный в разделе 5.1.1. соотношениями (5.4) и (5.5).

5.1.2. Теплоэрозионное разрушение композиционных теплозащитных материалов на примере стеклопластика

Кроме металлов экспериментальному исследованию подвергался также типичный представитель ТЗМ композиционный материал – стеклопластик, широко используемый в качестве конструкционного материала в авиационной и ракетно-космической технике. В отличие от алгоритма исследования металлических образцов, образцы из стеклопластика испытывались в высокотемпературных гетерогенных потоках как при разных значениях давления торможения $P_0 = 3,5$

МПа и $P_0 = 8,5$ МПа, так и при разных уровнях удельных расходов потока массы падающих частиц, $G_{p,1} = 2,9 \div 3,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ и $G_{p,1} = 15,5 \div 17,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 5.5.



$V_{\text{газ}} = V_p = 1200$ м/с; частицы из Al_2O_3 ; диаметр частиц $d_p = 50$ мкм

а – изменение удельной скорости уноса массы стеклопластика при взаимодействии высокоскоростным и высокотемпературным гомогенным потоком; б – изменение скорости уноса массы стеклопластика при взаимодействии высокоскоростным и высокотемпературным гетерогенным потоком; в – изменение безразмерной скорости уноса массы эрозионного разрушение стеклопластика

Рисунок 5.5. Сравнение зависимости удельных скоростей разрушения стеклопластика от давления торможения при взаимодействии с высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками

Анализ результатов исследований стеклопластика, так же как и в случае металлов, проводился с использованием указанной выше концепции разделения (см. соотношение 5.3).

Из анализа представленных на рисунке 5.5 *а, б, с* данных следует, что удельная скорость уноса массы стеклопластика как в высокоскоростном и высокотемпературном гомогенном, так и гетерогенном потоках зависит от давления торможения P_0 . Однако интенсивность этой зависимости определяется значениями удельных расходов потока массы частиц G_p , падающей на поверхность образца (рисунок 5.4 б). Видно, что при относительно низких удельных расходах потока массы частиц $G_{p,1}=2,9 \div 3,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ указанная зависимость сильная (рисунок 5.5 *а, б, с, кривая 1*). При высоких значениях удельных расходов потока падающих частиц на образец массы ($G_{p,2}=15,5 \div 17,3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$), как это на первый взгляд не парадоксально, в эксперименте не обнаружено влияния давления торможения P_0 на безразмерную скорость разрушения материала при воздействии высокоскоростного и высокотемпературного гетерогенного потока (рисунок 5.5 *б, кривая 2*). На наш взгляд это объясняется тем, что у поверхности испытуемого образца образуется весьма плотный динамический слой взвешенных в газе частиц, которые рассеивают (диссипатируют) как энергию частиц, так и энергию газаносителя. В результате поверхность образца подвергается воздействию частиц, обладающих кинетической энергией много меньшей, чем энергия частиц в набегающем потоке. Это значительно снижает интенсивность эрозии материала преграды, безразмерная скорость уноса массы которой становится независимой от давления торможения гетерогенного потока.

Таким образом, анализ приведенных экспериментальных данных термоэрозионного разрушения ТЗМ типа стеклопластик позволил установить, что механизм разрушения композиционных ТЗМ не адекватен механизму разрушения металлов и их сплавов. Этот вывод подтверждён результатами исследований, проведенных в работе [44]. На наш взгляд данное различие обусловлено тем, что все композиционные теплозащитные материалы обладают низкими значениями температуропроводности и эрозионной стойкости. Типичным представителем

таких материалов является теплозащитный материал стеклопластик. Для данного класса материалов механизм термоэрозионного разрушения обусловлен тем, что скорость линейного уноса за счёт эрозии больше, чем скорость распространения температурной волны в объёме материала, которая, как известно, определяется коэффициентом температуропроводности материала. То есть материал не успевает прогреваться, поэтому уносится всегда в холодном (непрогретом) состоянии.

Таким образом, тепловое состояние материала в процессе воздействия высокоскоростных и высокотемпературных гетерогенных потоков определяется рядом факторов. К таким факторам относятся: энергия, выделившаяся в точке удара частиц со скоростью V_p на поверхности, дисперсность частиц (диаметр) d_p , а также интервал времени τ_{er} между ударами частиц.

Кроме того, один из важнейших факторов, определяющих механизм теплоэрозионного разрушения композиционных ТЗМ, заключается в том, что составляющая термохимического разрушения таких материалов увеличивается в результате повышения плотности конвективного теплового потока в стенку. Эрозионная же составляющая увеличивается при повышении параметров, характеризующих кинетику взаимодействия частиц, а также массовой концентрации частиц в гетерогенном потоке [61]. Проведём краткий анализ влияния этих факторов на механизм теплоэрозионного разрушения ТЗМ.

5.2. Влияние концентрации частиц в гетерогенном потоке на эрозионную составляющую термоэрозионного разрушения конструкционных материалов

Как известно, энергия разрыва структурных связей на поверхности материала зависит от его теплового состояния, то есть от температуры поверхности. Если интенсивность эрозионного разрушения значительная, то тепловое состояние материала определяется его среднеинтегральной температурой на толщине δ . В этой связи среднеинтегральная температура является некой характеристикой,

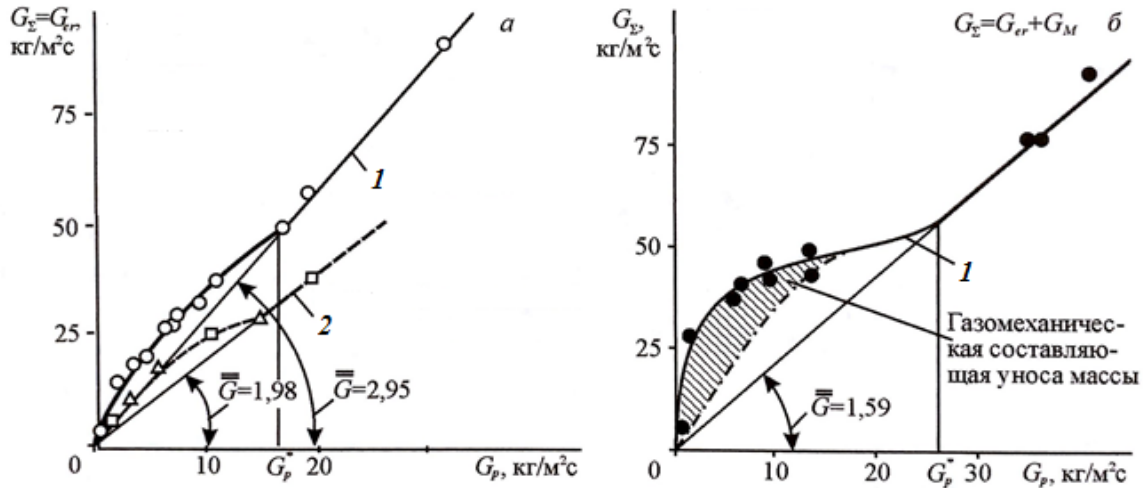
которая определяет эрозионную стойкость материала. Поэтому её уровень необходимо учитывать при исследовании на стендах эрозионной стойкости конструкционных материалов в условиях воздействия высокоскоростного гетерогенного потока [72].

Ранее отмечалось, что скорость эрозионного разрушения конструкционных материалов определяется не только кинетической энергией падающих частиц, но и массовой концентрацией частиц в гетерогенном потоке. В частности, при увеличении концентрации частиц в потоке, взаимодействующем с поверхностью конструкционных материалов, при прочих равных условиях, унос массы интенсивно возрастает. Это, в свою очередь, вызывает значительный рост градиента температуры в объёме материала, а, следовательно, уменьшает уровень среднеинтегральной температуры T_s уносимого материала по его толщине (рисунок 5.2). Как известно, среднеинтегральная температура на толщине δ материала представляется соотношением вида:

$$T_s = \frac{1}{\delta_{er}} \int_0^{\delta_{er}} T(y) dy, \quad (5.6)$$

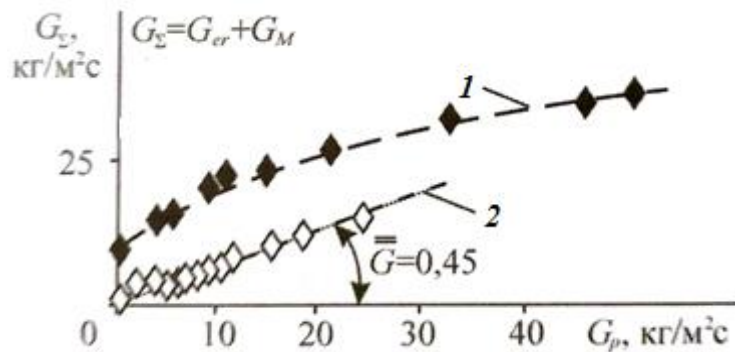
$T(y)$ – функция распределения температуры в объёме образца.

На рисунках 5.6 и 5.7 представлены результаты экспериментальных исследований теплоэрозионного разрушения некоторых материалов. На данных рисунках изменение массовой концентрации частиц представлено изменением удельных расходов массы частиц в гетерогенном потоке [72, 73].



- а) частицы – Al_2O_3 , $d_p=50$ мкм, параметры торможения: $p_0=3.5$ МПа, $T_0=2000$ К; 1 – стеклопластик, скорость частиц $V_p=1300$ м/с, 2 – пористый графит с пропиткой составом кремния и меди, скорость частиц $V_p=1350$ м/с.
- б) частицы – Al_2O_3 , $d_p=50$ мкм, параметры торможения: $p_0=8$ МПа, $T_0=2000$ К. 1 – стеклопластик, скорость частиц $V_p=960$ м/с

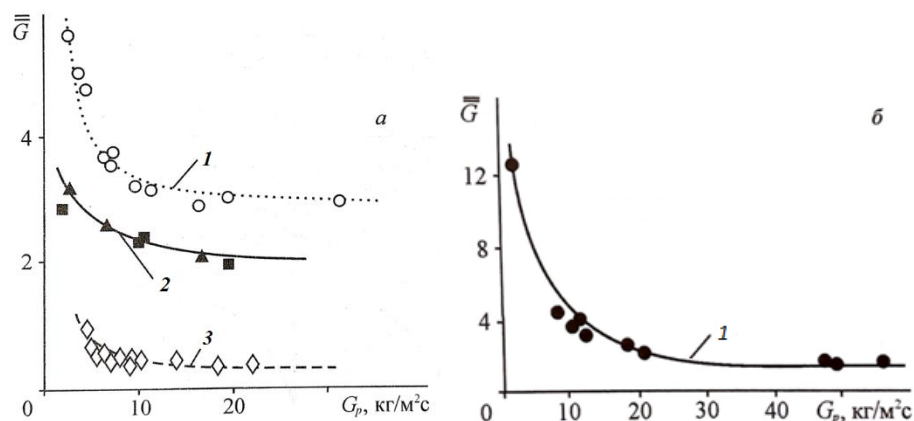
Рисунок 5.6. Зависимость скорости уноса массы теплоэрозионного разрушения разных ТЗМ от удельного секундного расхода массы подающих частиц



- 1 – частицы: Al_2O_3 , $d_p=50$ мкм, скорость $V_p=1240$ м/с. Параметры торможения: $p_0=8$ МПа, $T_0=2000$ К; 2 – частицы: Al_2O_3 , $d_p=50$ мкм, скорость $V_p=1170$ м/с. Параметры торможения: $p_0=3,5$ МПа, $T_0=1500$ К

Рисунок 5.7. Зависимость скорости уноса массы теплоэрозионного разрушения нержавеющей стали от удельного секундного расхода массы подающих частиц

Для проведения дальнейшего анализа перестроим представленные на рисунках 5.6 и 5.7 данные в виде зависимости безразмерной скорости уноса массы от удельного секундного расхода массы подающих частиц. В таком варианте приведенные экспериментальные данные представлены на рисунке 5.8.



а) 1 – стеклопластик, 2 – пористый графит, 3 – нержавеющая сталь. Давление торможения $p_0=3,5$ МПа;

б) 1 – стеклопластик. Давление торможения $p_0=8,0$ МПа

Рисунок 5.8. Зависимость безразмерной скорости уноса массы испытанных материалов от удельного секундного расхода массы подающих частиц

Из представленных на рисунке 5.6 экспериментальных данных следует, что если значения удельного секундного расхода массы подающих частиц G_p больше некоторого порогового G_p^* ($G_p > G_p^*$), суммарная скорость уноса массы испытанных материалов линейно зависит от G_p , то есть функция $G_{\Sigma}=f(G_p)$ линейная. При значении удельного секундного расхода массы подающих частиц $G_p < G_p^*$ указанная функция не линейная.

Из анализа данных, представленных на рисунке 5.8а следует, что экспериментальная зависимость $\bar{G}=f(G_p)$ нелинейная. Причём в указанном на рисунке диапазоне изменения G_p и при давлении торможения $P_0 \approx 3,5$ МПа, безразмерная скорость уноса массы \bar{G} стеклопластика возрастает в $\sim 1,9$ раза, для пропитанного смесью $Si+Cu$ пористого графита в $\sim 1,5$ раза и для нержавеющей

стали в $\sim 2,0$ раза. При увеличении давления торможения до $P_0 \approx 8,0$ МПа (рисунок 5.8б), $\bar{G} = f(G_p)$ стеклопластика возрастает более, чем в 6,0 раз.

Для обоснования указанного факта, установленного экспериментально, дальнейший анализ будем проводить при следующих допущениях. Будем считать, что:

- при ударе частиц о поверхность исследуемого образца отсутствуют неоднородные и нестационарные эффекты;
- при проведении анализа не учитывается перераспределение энергии по поверхности образца;
- траектории всех частиц перпендикулярны поверхности образца;
- взаимодействие частиц с поверхностью образца реализуется партиями поочередно. При этом при ударе партия частиц покрывают всю поверхность исследуемого образца, то есть коэффициент перекрытия поверхности частицами $k_p = 1$. В процессе взаимодействия образца с каждой последующей партией частиц уносится слой материала толщиной δ_{er} (рисунок 5.9).

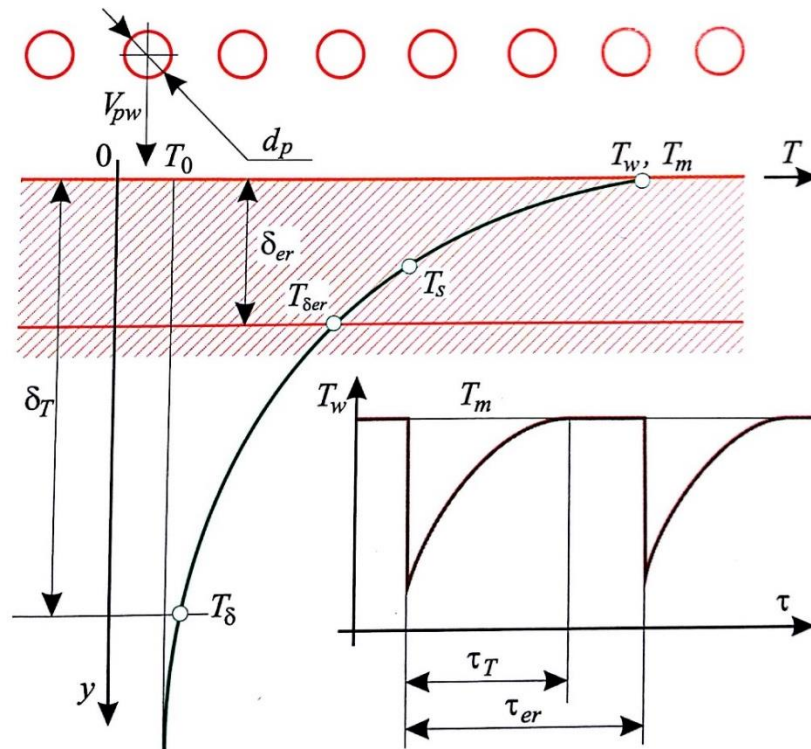


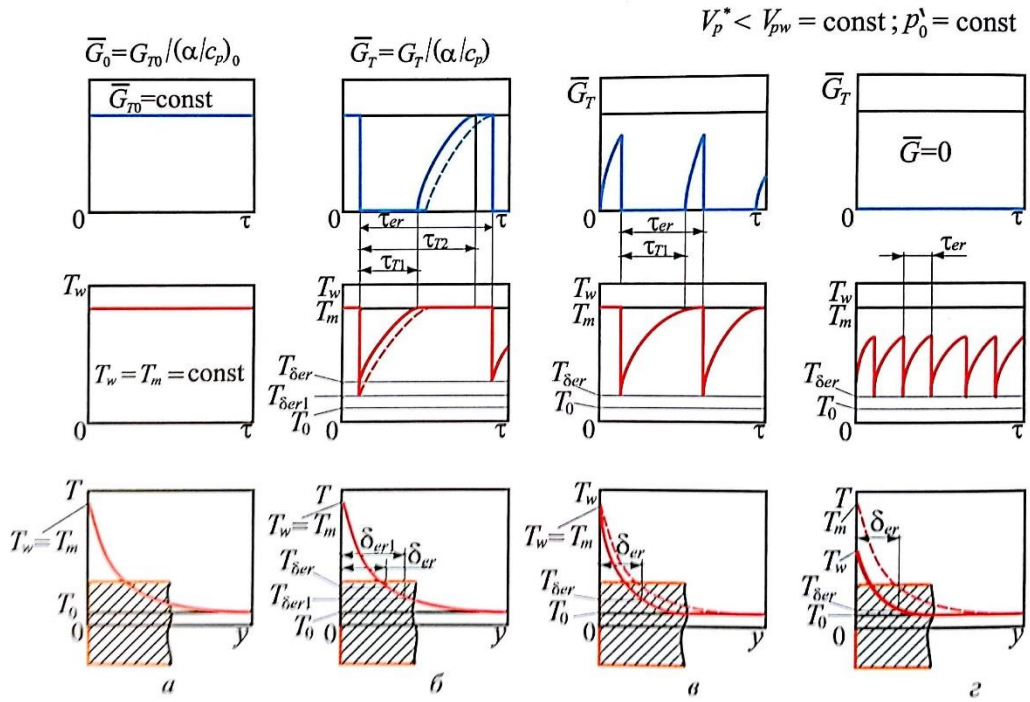
Рисунок 5.9. Схема взаимодействия партии частиц с поверхностью преграды

Согласно последнему допущению в результате взаимодействия очередной партии частиц с поверхностью образца, температура его поверхности изменяется циклично. Это обусловлено тем, что в момент эрозионного уноса слоя образца толщиной δ_{er} температура его поверхности T_w принимает более низкое значение, то есть значение температуры материала $T_{\delta_{er}}$, которую он имел на глубине δ_{er} (рисунок 5.9). Далее в интервале времени между партиями частиц происходит конвективный нагрев поверхности до температуры термохимического разрушения $T_w = T_m$ (рисунок 5.9). Этот этап зависит от соотношения между временем τ_T конвективного нагрева до температуры термохимического разрушения T_m и временем между ударами о поверхность очередной партии частиц τ_{er} . Если $\tau_T < \tau_{er}$, то термохимический унос материала не наступает, соответственно, образец материала будет уноситься только в результате эрозии. Если же $\tau_T > \tau_{er}$, то кроме эрозионного уноса термохимический унос будет осуществляться до следующего удара партии частиц о поверхность образца.

Проанализируем более подробно влияние массовой концентрации частиц гетерогенного потока на механизм уноса исследуемого материала². Рассмотрим случай, когда интенсификация частицами конвективной составляющей теплообмена при обтекании образца гетерогенным потоком не реализуется, а изменение скорости уноса массы образца в зависимости от температуры поверхности не будем учитывать.

Для удобства проведения анализа обратимся к схеме, представленной на рисунке 5.10 [57]. На схеме приведено изменение безразмерной скорости уноса массы в случае термохимического уноса образца $\bar{G}_r = f G_p$, температуры поверхности образца $T_w = f(G_p)$ и температурного поля $T(y) = f(G_p)$ в объёме образца в зависимости от удельной массы частиц G_p в гетерогенном потоке.

² Здесь, как и ранее массовые концентрации частиц гетерогенного потока представлена удельным секундным расходом массы подающих частиц, G_p .



a – термохимический механизм разрушения; *б* и *в* – термоэрозионный механизм разрушения; *г* – эрозионный механизм разрушения.

Рисунок 5.10. Схема изменения безразмерной скорости уноса массы материала образца \bar{G} , температуры его поверхности T_w и температурного поля $T(y)$ в объёме образца в случае разных механизмов разрушения стеклопластика

Вариант *a*: воздействие на образец высокотемпературного гомогенного потока ($G_p = 0$) (рисунок 5.10*a*). При таком воздействии на образец стеклопластика его безразмерный унос массы определяется только интенсивностью процесса термохимического разрушения материала. При этом термохимическое разрушение материала реализуется квазистационарно, то есть $\bar{G} = \text{const}$. Кроме того, температура поверхности образца $T_w = T_m = \text{const}$ и температурное поле $T(y)$ в объёме образца будут стационарны. Это обеспечивает также постоянство линейной скорости разрушения образца, $l_w = \text{const}$. В ряде работ показано [21, 47, 57, 74] и др., что унос массы при термохимическом квазистационарном механизме разрушения материала, его удельную массовую скорость разрушения можно рассчитать, используя соотношение типа:

$$G_w = \frac{\left(\frac{\alpha}{C_P}\right)_\Sigma \cdot (I_e - I_w) - \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4}{I_{эф}}, \quad (5.7)$$

где $I_{эф}$ – эффективная энтальпия материала, остальные параметры общеприняты.

Для расчёта скорости уноса массы материала с использованием (5.7) необходимо знать температуры T_w поверхности в процессе разрушения материала. Эта температура либо определяется в эксперименте, либо рассчитывается с использованием уравнения баланса тепловых потоков на поверхности в ходе термохимического разрушения. Такое уравнение имеет вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\alpha}{C_P}\right)_\Sigma \cdot (I_e - I_w) + \alpha_\kappa \cdot G_P \cdot \frac{V_P^2}{2} = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 + G_w(T_w) \cdot c_{матер} \cdot (T_w - T_{нач}) + \\ + G_w [\Delta Q_w + \Gamma \cdot \gamma \cdot (I_e - I_w)], \end{aligned} \quad (5.8)$$

где ΔQ_w – суммарная теплота всех физико-химических процессов, сопутствующих термохимическому разрушению стеклопластика, Γ – коэффициент газификации стеклопластика. В зависимости от уровня T_w коэффициент газификации материала может изменяться в пределах $0 \leq \Gamma \leq 1$. Параметр γ – коэффициент вдува газообразных продуктов разрушения материала в пограничный слой. Для оценки величины γ по итогам проведенных многочисленных экспериментальных и теоретических исследований для использования в инженерной практике была рекомендована весьма простая зависимость в виде:

$$\gamma = 0,6 \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_e}{\bar{\mu}_{охл.}}\right)^{0,24} \cdot \left(\frac{I_{W,охл.}}{I_e}\right)^{-0,03}, \quad (5.9)$$

где $\bar{\mu}_e$ – средняя молярная масса компонентов набегающего потока, $\bar{\mu}_{охл.}$ – средняя молярная масса газообразных компонентов вдува, $I_{W,охл.}$ – энтальпия газообразных компонентов вдува при температуре поверхности, I_e – энтальпия восстановления

набегающего потока. В точке торможения $I_e \equiv I_o$. Комплекс параметров $\left(\frac{I_{w,охл.}}{I_e}\right)$

учитывает влияние температурного фактора на величину параметра вдува γ .

Средняя молярная масса компонентов набегающего потока определяется с

ПОМОЩЬЮ ЗАВИСИМОСТИ:

$$\bar{\mu}_e = \sum_{i=1}^n (\mu_{ie} \cdot C_{ie}), \quad (5.10)$$

где μ_{ie} – мольная масса каждого i -го компонента набегающего потока, C_{ie} – массовая концентрация i -го компонента на внешней границе пограничного слоя, n – число компонентов в газовой смеси набегающего потока.

В свою очередь, среднюю мольную массу газообразных компонентов вдува можно найти с помощью выражения:

$$\bar{\mu}_{охл.} = \sum_{j=1}^m (\mu_{jохл.} \cdot C_{jохл.}), \quad (5.11)$$

где $\mu_{jохл.}$ – мольная масса каждого j -го компонента в составе газообразных компонентов вдува, $C_{jохл.}$ – массовая концентрация j -го компонента в составе газообразных компонентов вдува m – число газообразных компонентов вдува.

Вариант б: в случае воздействия на образец исследуемого материала высокоскоростного и высокотемпературного гетерогенного потока с низкой концентрацией частиц в потоке, термохимический механизм разрушения материала сопровождается эрозионным. Тогда, благодаря мгновенному эрозионному уносу слоя толщиной δ_{er} экспонируемого образца, температура его поверхности принимает уровень $T_w = T_{er}$, которую имел образец на глубине δ_{er} , (рисунок 5.10б). В этот момент термохимический унос массы образца отсутствует. Далее в течение времени τ_{T1} происходит нагрев поверхности образца до температуры T_m (рисунок 5.10б). В промежутке времени от τ_{T1} до τ_{T2} возобновляется термохимический унос с выходом на квазистационарный режим разрушения. Такой режим разрушения реализуется в интервале времени $\tau_{er} - \tau_{T2}$, то есть до следующего удара частиц о поверхность образца. Затем цикл повторяется. Значение времени τ_{er} можно по аналогии назвать временем ожидания между ударами частиц.

Таким образом, наличие частиц в потоке приводит к уменьшению термохимической составляющей в механизме разрушения материала.

Вариант *в*: При дальнейшем увеличении концентрации частиц G_p в гетерогенном потоке уменьшается время ожидания удара частиц τ_{er} (рисунок 5.10*в*). Тогда выполняется неравенство $\tau_{er} < \tau_{T2}$. В этом случае механизм термохимического разрушения не достигает своего квазистационарного режима до следующего соударения частицы. Соответственно, температура поверхности преграды и его температурное поле также не достигают значений, соответствующих квазистационарному режиму (рисунок 5.10*в* – штриховая линия). Это отличие усугубляется если τ_{er} приближается к τ_{T1} .

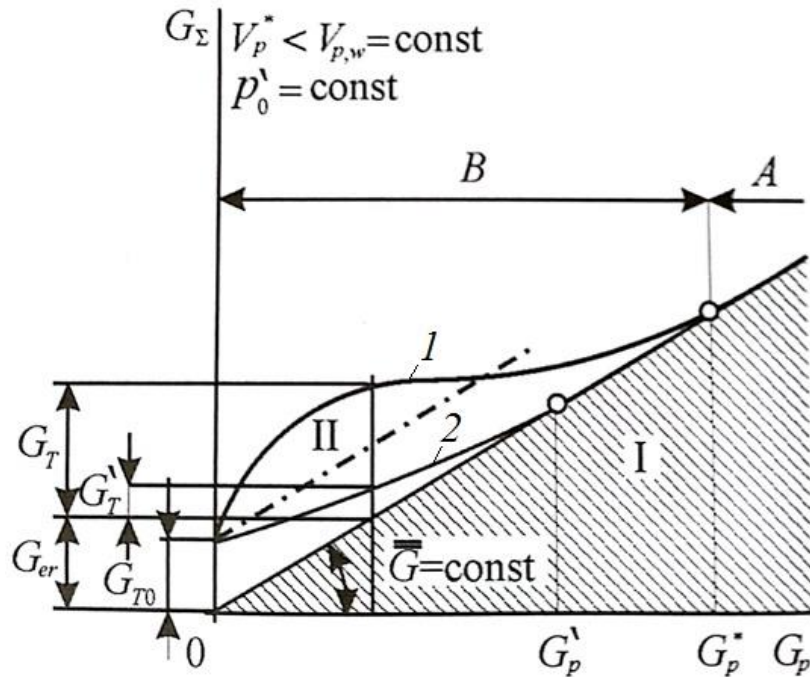
Итак, увеличение концентрации частиц в гетерогенном потоке вызывает дальнейшее уменьшение термохимической составляющей разрушения материала.

Вариант *г*: в случае, если концентрация частиц достигает такого уровня, при котором $\tau_{er} \leq \tau_{T1}$, термохимическая составляющая в механизме разрушения материала вообще исчезает (рисунок 5.10*г*). Это обусловлено тем, что температура поверхности в интервале времени между ударами частиц не успевает прогреться до температуры термохимического разрушения T_m , то есть $T_w < T_m$.

На рисунке 5.11 схематично представлено изображение процесса термоэрозионного разрушения стеклопластика с разделением на составляющие. На графике приведена зависимость $G_\Sigma = f(G_p)$, представляющая схему теплоэрозионного разрушения стеклопластика.

Предложенная схема получена с учётом интенсификации конвективного теплообмена на поверхности образца за счёт искусственной турбулизации пристенного слоя, обусловленной взаимодействием частиц с поверхностью. При этом сделано допущение, что механизм разрушения стеклопластика интегрирует два зависимых друг от друга процесса: термохимического и теплоэрозионного. Оба процесса зависят от удельного расхода частиц, то есть $G_\Sigma(G_p) = G_T(G_p) + G_{er}(G_p)$.

В таком случае, если не учитывать эффект экранирования разрушаемой поверхности слоем взвеси частиц перед образцом, а также зависимость безразмерной скорости эрозионного разрушения \bar{G} от среднеинтегральной температуры, то функция $G_{er}(G_p)$ является линейной при $G_p > G_p^*$ (область *A* на рисунке 5.11).



A – область эрозионного механизма разрушения; B – область термоэрозионного механизма разрушения; I – область эрозионной составляющей; II – область тепловой составляющей; 1 – G_T с учетом интенсификации конвективного теплообмена; 2 – G_T без учёта интенсификации конвективного теплообмена

Рисунок 5.11. Схема теплоэрозионного разрушения стеклопластика

Тангенс угла наклона этой функции представляет безразмерную скорость уноса массы эрозионного разрушения $\bar{G} = const$ (область I на рис. 5.11).

При $G_p=0$ безразмерная скорость разрушения стеклопластика соответствует безразмерной скорости уноса массы \bar{G}_w при термохимическом механизме разрушения, реализуемым при воздействии на образец высокотемпературного гомогенного потока (рисунок 5.10а).

Приведём дальнейший анализ механизма разрушения стеклопластика для самого простого варианта. Будем считать, что тепловое разрушение образца из исследуемого материала реализуется в квазистационарном режиме, то есть $\bar{G}_T = const$. В таком случае поверхность образца принимает температуру $T_w = T_m = const$. В объёме образца температурное поле не изменяется, линейная

скорость разрушения $\dot{i}_w = const$. При воздействии на образец гетерогенного потока даже с малой массовой концентрацией частиц удар каждой частицы образует кратер, глубиной δ_{er} . В этой связи температура поверхности образца мгновенно принимает значение его температуры T_{er} на глубине δ_{er} (рисунок 5.10 б).

В интервале времени τ_{T1} (рисунок 5.10 б) реализуется нестационарный прогрев неразрушающейся поверхности до значения T_m , однако температурное поле в объёме образца пока не соответствует квазистационарному. В этот период времени термохимический унос материала также нестационарный. Однако к моменту времени τ_{T2} (рисунок 5.10б) восстанавливается температурное поле, а, следовательно, и квазистационарный режим разрушения. Такой режим разрушения образца продолжается до следующего воздействия партии частиц и завершается по истечении интервала времени τ_{er} (рисунок 5.10 б). Применительно к поверхности исследуемого образца материала интервал времени τ_{er} называют средне-статистическим временем ожидания удара. С увеличением G_p удельная скорость уноса массы образца G_T уменьшается, а температура поверхности образца принимает всё меньшее значение, поскольку в связи с интенсивной эрозией материал не успевает нагреваться.

Таким образом, проведенный логический анализ в сочетании с полученными экспериментальными данными позволяет сделать важный вывод, что воздействие на образец материала гетерогенным потоком даже с низкой массовой концентрацией частиц в потоке вызывает уменьшение термохимической составляющей в механизме теплоэрозионного разрушения материала.

Проведенный выше анализ выполнен в приближения отсутствия интенсификации теплообмена за счёт искусственной турбулизации пограничного слоя, обусловленной частицами набегающего потока при их взаимодействии с поверхностью материала. В этой связи усложним задачу, то есть проведём анализ развития механизма теплоэрозионного разрушения стеклопластика с учётом интенсификации конвективного теплообмена на поверхности исследуемого образца.

Анализ экспериментальных данных по обтеканию различных тел гетерогенным потоком позволяет в первом приближении классифицировать те дополнительные факторы в конвективном теплопереносе, которые проявляются из-за наличия в потоке твердых частиц. К таким факторам относятся [2]:

- интенсификация конвективного теплообмена в пограничном слое вследствие нарушения ламинарной структуры пристеночного течения падающими и отражёнными частицами;

- ускорение перехода ламинарного режима течения в пограничном слое в турбулентный и вследствие этого интенсификация конвективного теплообмена за счёт образования кратеров и искусственной шероховатости на экспонируемой поверхности;

- дополнительная интенсификация конвективного теплообмена продуктами (осколками) эрозионного разрушения поверхности тела, которые нарушают газодинамику течения.

Экспериментальное исследование конвективного теплообмена при обтекании тел гетерогенным потоком затруднено. Это обусловлено тем, что определяемый в ходе эксперимента тепловой поток в стенку q_w включает две составляющие:

- во-первых, плотность теплового потока за счёт непосредственного воздействия на поверхность высокоскоростных частиц;

- во-вторых, плотность конвективного теплового потока от высокоскоростной газовой фазы при наличии в ней частиц (искусственная турбулизация пограничного слоя в «К-фазы»).

Таким образом, имеем:

$$q_w = q_p + q_{\text{конв.}}, \quad (5.12)$$

где q_p – плотность теплового потока от воздействия частиц на поверхность калориметра. Очевидно, q_p определяется удельным массовым расходом частиц в потоке:

$$q_w = k_p \cdot G_p \left[\frac{V_p^2}{2} + c(T_p - T_w) \right]. \quad (5.13)$$

В (5.13) k_p - коэффициент аккомодации энергии при ударе частиц о поверхность. Учитывает долю энергии, которую передают частицы поверхности при ударе. Коэффициент аккомодации энергии зависит от многих факторов. Например, от фазового состояния частиц, наличия на поверхности тела пленки расплава или шероховатости, угла атаки частиц и других. Коэффициент аккомодации энергии определяется экспериментально.

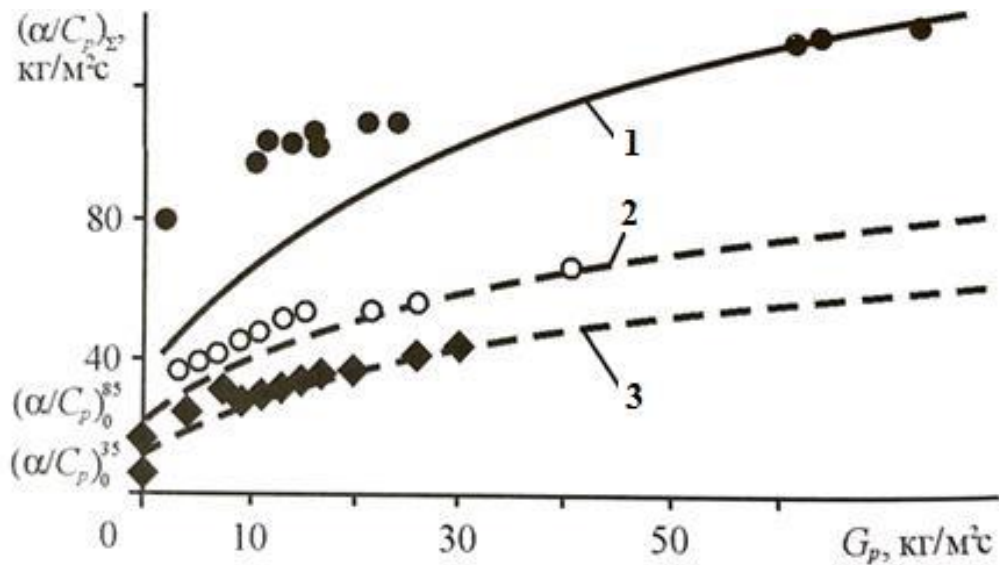
Плотность конвективного теплового потока $q_{конв}$, например, в передней критической точке обтекаемого тела согласно модифицированному закону Ньютона выражается соотношением:

$$q_{конв} = \left(\frac{\alpha}{C_p} \right)_0 (I_0 - I_w). \quad (5.14)$$

В работе проведено исследование влияния величины удельного расхода «К-фазы» в гетерогенном потоке на процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Установлено, что с увеличением массовой концентрации частиц это влияние усиливается, поскольку трек, образуемый за движущейся в потоке газа-носителя частицей, имеет завихрения, то есть является турбулентным.

Кроме того, проведены исследования влияния дисперсности частиц на режим течения в пограничном слое. Эксперименты, с целью увеличения вязкости носителя частиц в потоке, проводились в гетерогенной водяной струе на моделях диаметром 50 мм. Дисперсность частиц в потоке варьировались от 13 до 120 мкм. Установлено, что частицы небольших размеров (до 50 мкм) практически не оказывали влияния на процесс режима течения в пограничном слое. С увеличением диаметра частиц в потоке величина критического критерия Рейнольдса, характеризующего процесс перехода, уменьшалась.

Далее в работе проведено исследование влияния интенсификации конвективного теплообмена в пограничном слое при взаимодействии высокоскоростного гетерогенного потока с твёрдой поверхностью. Результаты исследований представлены на рисунке 5.12.



1 – стеклопластик ($p_0 = 8,0$ МПа, $T_0 = 2000$ К), 2 – стеклопластик ($p_0 = 3,5$ МПа, $T_0 = 2000$ К), 3 – нержавеющая сталь ($p_0 = 3,5$ МПа, $T_0 = 2000$ К)

Рисунок 5.12. Изменение параметра конвективного теплообмена в зависимости от удельного массового секундного расхода частиц в гетерогенном потоке

Анализ полученных данных установил, что при низких уровнях потока массы воздействующих на поверхность частиц ($G_p = 0 \div 3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$) происходит резкое увеличение параметра теплообмена $(a/c_p)_\Sigma$, темп роста которого с дальнейшим увеличением G_p уменьшается. Очевидно, это обусловлено тем, что с увеличением G_p увеличивается унос массы материала за счёт эрозии. Это снижает влияние на теплообмен конвективной составляющей. Это влияние тем интенсивнее, чем больше значения G_p и $\overline{G_w}$.

Таким образом, установленное экстремальное изменение конвективного теплообмена в зависимости от увеличения C_p (сначала $(a/c_p)_\Sigma$ растёт, а затем падает) при одинаковых уровнях скорости частиц V_p сказывается на характере поведения кривой суммарного уноса массы стеклопластика в области термоэрозионного механизма разрушения.

Композиционные материалы, которые потенциально обладают большим значением эрозионного уноса при одинаковой скорости V_p частиц в момент удара

о поверхность, сначала интенсивно увеличивают термохимическую составляющую уноса G_T с увеличением G_p от нуля до некоторого значения (рисунок 5.11, зона II), затем при дальнейшем увеличении G_p термохимическая составляющая уменьшается (рисунок 5.11, зона II). При значении $G_p = G_p^*$ термохимическая составляющая уноса становится исчезающе малой и область термоэрозионного механизма разрушения (В на рисунке 5.11) перейдет в область чисто эрозионного механизма разрушения (А на рис. 5.11).

Проведенный выше анализ результатов экспериментальных исследований расширяет наше понимание физико-химического механизма разрушения конструкционных материалов при воздействии высокоскоростных и высокотемпературных гетерогенных потоков. Это в дальнейшем позволит более строго составить математическую модель теплоэрозионного разрушения материалов.

Выводы по главе 5

1. Предложен метод разделения тепловой и эрозионной составляющих термоэрозионного уноса конструкционных материалов при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками.

2. На принципе сопоставления эрозионной стойкости и температуропроводности выявлено два класса конструкционных материалов (металлические и композиционные ТЗМ) с принципиально разными механизмами их разрушения при воздействии высокоскоростными и высокотемпературными гетерогенными потоками.

3. Установлено, что для материалов с высокими значениями температуропроводности и эрозионной стойкости (металлы и их сплавы) в механизме их разрушения выполняется условие аддитивности тепловой и эрозионной составляющей теплоэрозионного разрушения материалов.

4. Установлено также, что для материалов с низкими значениями температуропроводности и эрозионной стойкости (композиционные теплозащитные материалы) свойственна взаимозависимость тепловой и эрозионной составляющих механизма разрушения.

5. Проведен анализ влияния массовой концентрации частиц в гетерогенном потоке на механизм термоэрозионного разрушения стеклопластика. Показано, что с увеличением массовой концентрации частиц в потоке вначале в механизме разрушения стеклопластика (композиционных ТЗМ) превалирует термохимическое разрушение материала. При дальнейшем увеличении массовой концентрации частиц механизм разрушения материалов переходит в режим теплоэрозионного разрушения, а затем в режим только эрозионного разрушения.

6. Проведено исследование влияния величины удельного расхода «К-фазы» в гетерогенном потоке на процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Установлено, что с увеличением массовой концентрации частиц это влияние усиливается, поскольку трек, образуемый за движущейся в потоке газаносителя частицей, имеет завихрения, то есть является турбулентным.

Заключение

1. Проведен анализ использования гетерогенных потоков в транспортном и энергетическом машиностроении с целью сопоставления энергетических режимов и основных параметров применяемых гетерогенных потоков. Рассмотрены применяемые методы и средства моделирования процессов взаимодействия гетерогенных потоков с твердой стенкой с заданными параметрами.

2. Рассмотрена газодинамика гетерогенных потоков, отмечена необходимость применения допущений в виде модели взаимопроникающих континуумов и отражены границы ее применимости. Описаны основные силы, действующие в газовом потоке на изолированную частицу. Отмечены особенности взаимодействия дисперсной фазы и несущего потока, которые заложены в коэффициенте сопротивления C_D . Проанализированы зависимости для вычисления коэффициента сопротивления C_D для частиц сферической формы.

3. Проведен критический анализ методов и средств диагностики основных параметров при исследовании взаимодействия гетерогенных потоков с преградой. Подробно рассмотрены:

- лазерная доплеровская анемометрия, как основной метод для измерения локальных скоростей, как газа-носителя, так и частиц.
- калориметрические методы измерения конвективного теплового потока от гетерогенной среды в исследуемый объект. Рассмотрены калориметры «стержневого» и «таблеточного» типа.
- контактные и бесконтактные методы диагностики температуры поверхности исследуемого объекта.

4. Разработана математическая модель газовой фазы и «К-фазы» для решения задачи обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой. На основе данных моделей разработана расчётная схема для решения задачи с использованием CFD комплекса ANSYS CFX. Проведена серия вычислительных

экспериментов для наборов частиц разной дисперсности. Произведена визуализация и анализ полученных результатов. Показано, что:

- при обтекании гетерогенным гиперзвуковым потоком затупленного тела перед КЛА как и в случае адекватного обтекания гомогенным гиперзвуковым потоком образуется отошедшая ударная волна и сжатый слой;

- параметры твердой фазы изменяются аналогично параметрам несущей фазы, но в силу инерционности «К-фазы», проходя ударную волну, они не изменяются скачкообразно;

- скорость изменения параметров «К-фазы» прямо пропорциональна диаметру частицы.

5. Проведен критический анализ существующих моделей эрозионного разрушения. Подробно рассмотрена:

- Эрозия при комнатной температуре.
- Эрозия при повышенной температуре.
- Однопараметрическая модель эрозионного разрушения.
- Двухпараметрическая модель эрозионного разрушения.

Определены «пороговые» значения параметров эрозионного разрушения.

Разработана математическая модель взаимодействия высокоскоростного неизотермического гетерогенного потока с поверхностью летательного аппарата конической формы, притупленного сферой.

Список литературы

1. Никитин П.В. Гетерогенные потоки в инновационных технологиях. – М.: Янус-К, 2010. – 244 с.
2. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. – М.: Янус-К, 2007. – 392 с.
3. Клейс И.Р., Ууэмыйс Х.Х. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. – М.: Машиностроение, 1986. – 157 с.
4. Nikitin P.V. Heat Protection of Spacecrafts // Report of Second Russian – Chinese Scientific Conference "Aero - and Space Engines Power Plants", 1992 – 8с.
5. Nikitin P.V. Problem issues of development Thermal Protection Systems for Spacecraft // The paper of the First International Conference on Aerospace Heat Exchanger Technology, Palo Alto, California, USA. February, 1993. – с. 56 – 60.
6. Nikitin P.V. The Thermal Protection Systems for Spacecraft // The paper of The 6-th International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering. Seoul, Korea, May, 1993, с. 42 – 47.
7. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. – Новосибирск: Наука, 1980. – 159 с.
8. Стернин Л.Е. «Основы газодинамики двухфазных течений в соплах». — М.: Машиностроение, 1974. – 212 с
9. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.
10. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. – Машиностроение, 1976. – 224 с.
11. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Математическая модель обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 5, № 11. – С. 490-497.

12. Буляккулов М.М., Никитин П.В. Численное моделирование процессов обтекания высокоскоростным неизотермическим гетерогенным потоком летательного аппарата конической формы, притупленного сферой // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 7, № 12. – С.558-565.
13. Деревенщиков В.Б., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Шебеко В.Н. Возможности моделирования и стенды для теплоэрозионных исследований. – М., 1194. – 62с – (Предпринт/ИВТАН, №2 – 363).
14. Кондрашов Э.К., Владимирский В.Н. Эрозионостойкие лакокрасочные покрытия. – М.: Химия, 1989.
15. Бирюков В.И., Виноградов В.Н., Мартиросян М.М. и др. Абразивное изнашивание газопромыслового оборудования. – М.: Недра, 1967.
16. Поволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Техника, 1989.
17. Спринджер Дж.С. Эрозия при воздействии капель жидкости. – М.: Машиностроение, 1981. – 200 с.
18. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев В.Б. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
19. Гущин В.В., Колосов Б.И., Потапов И.Н. Исследование соударения высокоскоростных частиц с полубесконечной преградой при учете инерционности тепловых процессов. – М., 1983. – (Предпринт/ЦНИИАИ).
20. Поволоцкий Е.А., Ясев А.Г., Гришин В.С., Маринченко И.А. имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1987. – №4. – С. 182–188.
21. Златин Н.А., Красильщиков А.П., Мишин Г.Н., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. – М.: Наука, – 1974.
22. Полежаев Ю.В. Методы и средства газодинамических испытаний летательных аппаратов. – М.: МАИ, 1983. – 89 с.

23. Полежаев Ю.В., Шишков А.А. Газодинамические испытания тепловой защиты. Справочник. – М.: Промедэк, 1992. – 248 с.
24. Patent USA № 3893335, cl. 73 – 147. Device for simulating reentry conditions in a particle laden atmosphere / Johnson R., Von Ohin H. – 1975.
25. Игнатов С.Ф., Репин И.В., Сахаров В.П. Установка для испытания материалов на износостойкость при ударе твердых частиц // Заводская лаборатория. – 1981. – Т.47, N18. – С.89 – 91.
26. Игнатов С.Ф., Михатулин Д.С., Чирков И.В. Результаты исследования движения частиц в сопле Лаваля // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1982. – N4. – С. 163-167.
27. Shneider P/J/ reentry weather erosion simulator // AIAA Paper N78 – 816.
28. Рахматуллин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // ПММ, 1956. – Т.20, вып.2. – С. 184-195.
29. Elghobashi S. Particle-Laden Turbulent Flow: Direct Simulation and Closure Models // Applied Scientific Research, 1991. – V.48. – P. 301.
30. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н., Фомин В.М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. – Новосибирск. – Наука, 1980. – 159 с.
31. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. – 423 с.
32. Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows // AIAA Journal, 1976. – V.14. – P. 707.
33. Лазерная диагностика потоков. Под ред. В.А. Фабриканта. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 287 с.
34. Ринкевичюс Б.С. Лазерная анемометрия. — М.: Энергия, 1978. – 159 с.
35. Лазерное доплеровское измерение скорости газовых потоков. Сб.№1 / Под общ. ред. Г.Л. Гродзовского. – М.: Изд. ЦАГИ, 1976. – 286 с.
36. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А., и др. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.

37. Меснянкин С.Ю., Никитин П.В. Система диагностики высокотемпературных газовых потоков. Учебное пособие. – Москва, МАИ, 1991. – 56с.
38. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
39. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831с.
40. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. – М.: Машиностроение, 1972. – 332 с.
41. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Metallургия, 1977. – 477 с.
42. Гордов А.Н., Жугалло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
43. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар. Справочник. – М.: Metallургия, 1983. – 360 с.
44. Чернин СМ., Коган А.В. Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. – М.: Энергия, 1980. – 95 с.
45. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учеб. для авиационных специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
46. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Тепломассообмен, термохимическое и термоэрозионное разрушение тепловой защиты. Курс лекций. – М.: ЯНУС-К, 2011. – 520 с.
47. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Гостехиздат, 1953.
48. Лепешинский И.А. Газодинамика одно- и двухфазных течений в реактивных двигателях. – М. Издательство МАИ. 2003.
49. Никитин П.В. Тепловая защита: учеб. Высшей школы. – М.: Изд. МАИ, 2006. - 512 с.

50. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
51. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с.
52. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 2: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
53. Д. Л. Ревизников, А. В. Способин. Численное моделирование воздействия дисперсной фазы на поверхность затупленного тела в сверхзвуковом запыленном потоке// Математическое моделирование, 2007. – С.101–111.
54. Tshirkunov Yu.M. Gas-particle flows around bodies – key problems. Modeling and numerical analysis // Proc. Fourth International Conference on Multiphase Flow (Ed.: E. Michaelides), May 27 – June 1, 2011, New Orleans, USA. – CD ROM Proc. ICMF'2001, paper №609. – 31 p.
55. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998. – 471 p.
56. ANSYS CFX v.10. Release. Theory Reference.
57. Chung T. J. Computational Fluid Dynamic. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 1021 p.
58. Ferziger J. H., Perić M. Computatational Methods for fluid Dynamics. – 3, rev. ed. – Berlin: Springer, 2002. – 423 p.
59. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
60. Харламов Ю.А. Механизм пластической деформации при формировании газотермических покрытий. Порошковая металлургия, 1981. №12. – С. 31 – 35.
61. Справочник по физике / Б.М. Яворский и др. – М.: Наука, 1974. – 259 с.
62. Перельман Р. Г. Эрозия элементов двигателей энергоустановок. – М.: Машиностроение 1986. – 251с.

63. Полежаев Ю.В. О механизме взаимодействия атмосферных образований на летательные аппараты. Сборник статей: Исследование высокоскоростных ударных явлений. – М.: ВВИА им. Жуковского Н.Г., 1981. – С. 29 – 43.
64. Костиков В.И., Митин Б.С. О движущей силе растекания жидкой фазы по твердой: Сб. Высокотемпературные материалы. – М.: Metallurgy, 1986. – С.114.
65. Красулин Б.Л. Теоретическая и экспериментальная химия. – 1967. – вып. 1, т. 3. – С. 58.
66. Сметлзер, Гулден, Комптон. Механизм эрозии металлов при ударном воздействии частиц пыли // Теоретические основы инженерных расчетов, серия Д, 1970. – Т.92, N3. – С.225 – 238.
67. Tilly G.P. Erosion caused by airborne particles // Wear, 1969. – V.14. – P.63-79.
68. Sheldon G.L., Kanhere A. An investigation of impingement erosion using single particles // Wear, 1970. – V.16. – P.447 – 465.
69. Янг, Раф. Определение эрозии металлов при ударном воздействии частиц // Теоретические основы инженерных расчетов, серия Д, 1977. – Т.99, N2. – С.25 – 30.
70. Swain C.E.the effects of particle shock laden interaction on reentry vehicle performance // AIAA Paper. – N75 – 734.
71. Полежаев Ю.В. Теплогазодинамическая обработка ЛА. – М.: МАИ, 1986. – 69 с.
72. Полежаев Ю.В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении с частицами // ИФЖ, 1979. – Т.37, N3. – С.389 – 394.
73. Васин А.В., Полежаев Ю.В. Унос массы при совместном эрозионном и тепловом воздействии двухфазного потока // Изв. АН СССР. МЖГ, 1984. – N1. – С. 120 – 126.

74. Васин А.В., Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В. О влиянии теплового состояния материалов на их эрозионную стойкость в запыленном газовом потоке // Изв. АН СССР. МЖГ, 1985. – №6. – С. 172 – 175.

75. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.С. Моделирование процесса теплоэрозионного воздействия двухфазных сред // МЖГ, изд. АН СССР, 1989. – №4. – С.92 – 98.

76. Никитин П.В., Сотник Е.В. Особенности механизма разрушения стеклопластических теплозащитных материалов при переменных параметрах теплового воздействия // Тепловые процессы в технике – 2011. – Т.3, № 8. – С. 348-359.